

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Hornicko-Geologická fakulta
Institut environmentálního inženýrství

Posouzení stability viskozních roztoků pro účely stanovení
velikosti částic a zeta potenciálu

Bakalářská práce

Autor:
Vedoucí bakalářské práce:

Radim Lukáš
Ing. Jan Thomas, Ph.D.

Ostrava 2011

AUTORSKÉ PROHLÁŠENÍ

Celou bakalářskou práci včetně příloh, jsem vypracoval sám samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména paragraf § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – využití díla školního.

Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst.3).

Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bakalářské práce bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěné v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.

Souhlasím s tím, že bakalářská práce je licencována pod Creative Commons Attribution – Noncommercial - ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst.4 autorského zákona.

Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 30.4.2011

.....

Radim Lukáš

Anotace

Předložená práce se zabývá tématem „*Posouzení stability viskózních roztoků pro účely stanovení velikosti částic a zeta potenciálu*“. Je rozdělena na dvě základní části a to teoretickou a praktickou. V teoretické části je základní shrnutí poznatků koloidní chemie. Tyto poznatky lze rozdělit na obecnou charakteristiku disperzních soustav a dále na kinetické, reologické a optické vlastnosti disperzních soustav. Další část teoretické práce se zabývá zeta potenciálem a jeho změnami a také stabilitou koloidních částic. Praktická nebo též experimentální část práce je věnována měření zeta potenciálu vybraných vzorků ve vodném prostředí, bez a s přidáním aditiva. A v neposlední řadě také měření velikosti částic vzorků ve vodném prostředí a měření viskozity jednotlivých aditiv.

Klíčová slova: disperzní soustava, koloidní částice, zeta potenciál, velikost částic, viskozita

Summary

This thesis deals with theme „*Assessment of viscous solutions stability for particle size and zeta potential measurements*“. This thesis is divided on the two basic parts and so theoretical and practical. In the theoretical part is basic resume knowledge colloid chemistry. We can divided this knowledge on the general characteristic disperse systems. The other part of theoreticals work deals of zeta potential and change of zeta potential and so stability of colloid particles. Practicles part is devoted zeta potential measurements of choosing samples in water surroundings, without and with the addition of additive. This thesis deals with particles size meauserement of samples in the water surroundings and viscosity mesuserement of various additive also.

Keywords: disperse system, colloidal particules, zeta potential, particles size, viscosity

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracovala samostatně a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě dne 30.4.2011

.....

Radim Lukáš

Obsah:

1. ÚVOD	1
2. SHRUTÍ POZNATKŮ V OBLASTI KOLOIDNÍ CHEMIE MIKROČÁSTIC	2
2.1. DISPERZNÍ SOUSTAVY.....	2
2.1.1. <i>Klasifikace dispezních soustav</i>	2
2.1.2. <i>Koloidní disperze</i>	3
2.1.3. <i>Klasifikace koloidních soustav</i>	4
2.2. KINETICKÉ VLASTNOSTI DISPERZNÍCH SOUSTAV	5
2.2.1. <i>Brownův pohyb a jeho důsledky</i>	6
2.2.2. <i>Difúze</i>	6
2.2.3. <i>Elektroforéza</i>	7
2.2.4. <i>Osmóza</i>	8
2.2.5. <i>Sedimentace</i>	8
2.3. REOLOGICKÉ VLASTNOSTI DISPERZNÍCH SOUSTAV	10
2.3.1. <i>Viskozita kapalin</i>	10
2.3.2. <i>Viskozita koloidních soustav v kapalném disperzním prostředí</i>	12
2.4. OPTICKÉ VLASTNOSTI KOLOIDNÍCH SOUSTAV	14
2.4.1. <i>Absorpce záření</i>	14
2.4.2. <i>Rozptyl záření</i>	15
3. VLIV VIZKOZITY PROSTŘEDÍ NA STABILITU MĚŘENÍ VELIKOSTI ČÁSTIC A ZETA POTENCIÁLU	18
3.1. CHARAKTERISTIKA ZETA POTENCIÁLU	18
3.1.1. <i>Elektrická dvojvrstva</i>	18
3.1.2. <i>Metody měření zeta potenciálu</i>	19
3.1.3. <i>Vliv Zeta potenciálu na stabilitu koloidní disperze</i>	20
3.2. STABILIZACE KOLOIDNÍCH ČÁSTIC	22
3.2.1. <i>Vliv teploty a světla na změnu stability disperzní soustavy</i>	25
4. EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM VIZKOZITY VYBRANÝCH ROZTOKŮ	26
4.1. MĚŘENÍ PH.....	26
4.2. MĚŘENÍ VIZKOZITY	27
5. VYHODNOCENÍ ANALYTICKÝCH DAT.....	29
5.1. MĚŘENÍ ZETA POTENCIÁLU	29
5.1.1. <i>Praktický postup při měření zeta potenciálu</i>	30
5.1.2. <i>Měření velikosti zeta potenciálu pro jednotlivé vzorky</i>	31
5.2. MĚŘENÍ VELIKOSTI ČÁSTIC POMOCÍ PŘÍSTROJE ZETASIZER NANO	33
6. SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	38
7. ZÁVĚR	40

SEZNAM LITERATURY

SEZNAM OBRÁZKŮ

SEZNAM TABULEK

1. Úvod

V posledních několika letech se čím dál více tlačí do popředí zájmu fyziků, chemiků, farmaceutů a vědců obecně zájem o částice s minimální velikostí. Tuto minimální velikost jsi lze představit v řádech mikrometrů a nanometrů (neboli nanočástic). Jejich unikátní vlastnosti, za které vděčí především nerovnovážnému poměru mezi jejich povrchem a objemem, jsou zkoumány pro široké množství použití. Proto zájem vědců v souvislosti s těmito částicemi se zaměřuje zejména na poznávání těchto jejich vlastností a samozřejmě také na jejich následné využití v soukromém sektoru, ať už v průmyslu, lékařství anebo v běžném životě.

Výzkum a rozvoj tohoto poměrně mladého vědeckého směru se zdá být zajímavý a také celospolečensky prospěšný a významný. A proto jsem jsi vybral jako téma své bakalářské práce „*Posouzení stability viskózních roztoků pro účely stanovení velikosti částic a zeta potenciálu*“. Kdy se v této práci zabývám mimo jiné velikostí částic a jejich stabilitou v daném systému. Tento systém jsi laik může představit třeba jako vodní prostředí ve kterém se objevuje velké množství mikročástic a nanočástic, které mohou mít buď anorganický charakter (prachové částice, částčky písku, jílové částice atd.) nebo organický charakter (bílkoviny, tuky, zbytky organické hmoty atd.). Dalším takovýmto systémem může být atmosféra ve které je také velké množství prachových částic.

A právě zde vidím možnost využití poznatků mé bakalářské práce. Ve své praktické části se věnuji posuzování stability těchto částic za určitých podmínek, odlišných od klasického stavu systému. Představme jsi, že by bylo možné účinně stabilizovat tyto částice jak ve vodě tak i vzduchu, pomocí různých aditivních přípravků. Tyto prostředky by měnily vlastnosti systému a tím by se měnila i stabilita částic v nich. Tím by se dalo docílit zvýšení účinnosti a úspěšnosti odstranění těchto částic ze systému anebo samozřejmě také udržení těchto částic v daném systému.

2. Shrnutí poznatků v oblasti koloidní chemie mikročástic

Základní shrnutí poznatků, které je v této kapitole uvedeno je velmi důležité pro základní přehled a orientaci se základními pojmy.

2.1. Disperzní soustavy

Soustava, která obsahuje alespoň dva druhy hmoty, přičemž jeden druh je rozptýlen ve druhém ve formě více nebo méně jemných částic. Rozptýlený druh se nazývá *disperzní podíl*, spojitý druh *disperzní prostředí*. [1].

Je to tedy směs, kde jedna látka (dispersum) je určitým způsobem rozptýlená ve druhé (dispergens). [2]

2.1.1. Klasifikace disperzních soustav

Disperzní soustavy lze třídit podle různých kritérií, jako je velikost či tvar dispergovaných částic a nebo skupenství disperzního prostředí a disperzního fázeu. Částice disperzního fázeu mohou být různě velké. Velikost disperzních částic vyjadřujeme „*stupněm disperzity*“, což je převrácená hodnota lineárního rozměru částice (průměr, délka hrany atd.). Je-li tedy disperzní fáze rozptýlena jemněji, říkáme, že má vyšší stupeň disperzity.

Soustavy nazýváme *monodisperzní*, mají-li všechny částice disperzního fázeu stejnou velikost. Vyskytují-li se naopak v soustavě částice s různou velikostí, jedná se o soustavu *polydisperzní*.

Podle velikosti dispergovaných částic disperzního fázeu, tedy stupně disperzity, lze disperzní soustavy dělit na disperze *analytické, koloidní a hrubé*. [3]

Základní charakteristika a vlastnosti disperzních soustav jsou stručně uvedeny v tabulce 1.

Analytické disperze	Koloidní disperze	Hrubé disperze
$d < 10^{-9} \text{ m}$	$10^{-9} \text{ m} < d < 10^{-6} \text{ m}$	$d > 10^{-6} \text{ m}$
homogenní soustavy pravé roztoky nízkomolekulárních látek termodynamicky stálé nefiltrovatelné vysoká difúze a osmóza	mikroheterogenní soustavy pravé roztoky látek vysokomol. i nano či mikrodisperze dalších látek termodynamicky stálé i nestálé filtrovatelné přes ultrafiltry slabá difúze a osmóza	makroheterogenní soustavy nestálé filtrovatelné přes filtrační papír difúze a osmóza není

Tabulka 1 Členění disperzních soustav dle velikosti dispergovaných částic a jejich základních vlastností.
Symbol d představuje velikost částic v metrech [4]

2.1.2. Koloidní disperze

Koloidní disperze jsou významné především díky svým unikátním fyzikálně chemickým vlastnostem (např. závislost absorpce světla na velikosti částic).

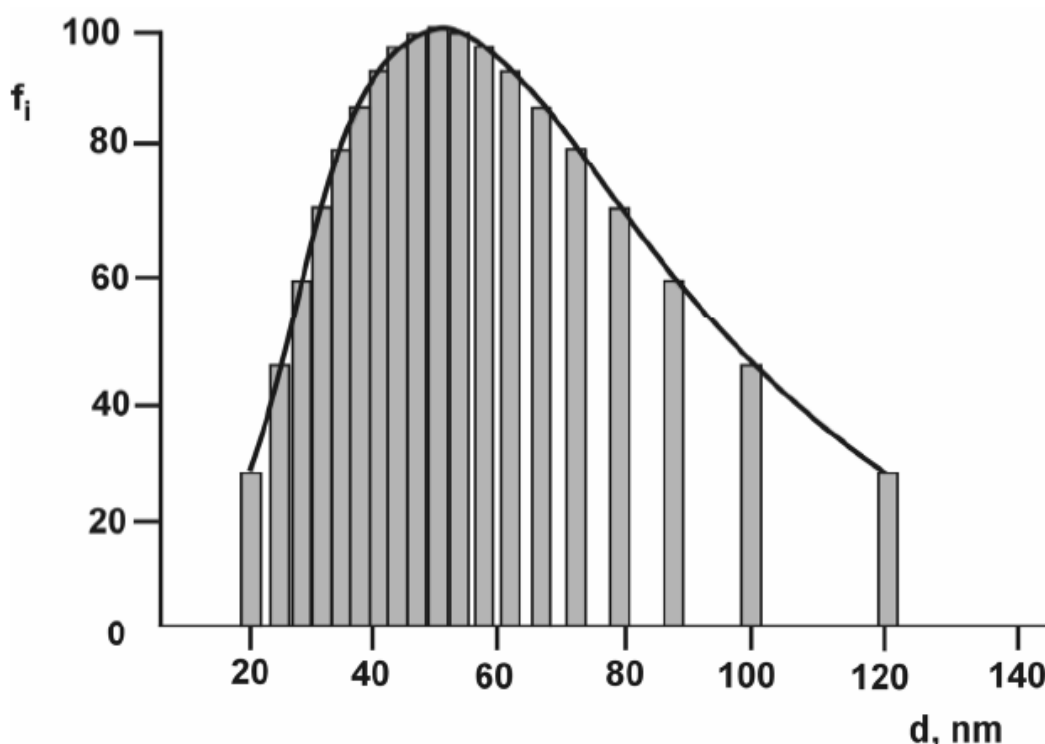
S klesající velikostí částic roste plocha fázového rozhraní mezi disperzní fází a disperzním prostředím, nebo-li s klesající velikostí částic roste podíl povrchových molekul stýkajících se s disperzním prostředím oproti počtu molekul uvnitř dispergovaných částic. U částic okolo 1 mm je přibližně 30% molekul povrchových. Specifické chování koloidních částic tedy vyplývá z jejich malých rozměrů, resp. s jejich velice rozměrnou plochou fázového rozhraní, kde se značně uplatňují povrchové jevy (např. adsorpce). Optické chování koloidních částic o velikosti jednotek nanometrů je v porovnání s makroskopickými částicemi rovněž velmi specifické, protože v takto malých částicích dochází ke zcela jinému uspořádání energetických hladin elektronů, což se projevuje zejména při interakci těchto soustav s elektromagnetickým zářením (absorpce, luminiscence atd.).[3]

Monodisperzní koloidní soustavy jsou velmi vzácné (např. řízená výroba latexu), častěji se však setkáváme s více či méně polydisperzními soustavami. Zastoupení různě velkých částic je potřeba vhodně charakterizovat. K tomuto účelu používáme „distribuční funkci“, jejímž vyjádřením je „distribuční křivka“ (obr.1). Distribuční funkce umožňuje rozdělení všech přítomných částic v koloidní soustavě do velikostních tříd. Nejvhodnější distribuční funkcí popisující velikost částic

polydisperzních koloidních soustav je „asymetrická lognormální distribuční funkce f_i “.[3]

$$f_i(\ln d_i) = \frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln d - \ln \overline{d_g}}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right]$$

kde d_i je velikost částice, d_g je geometrický průměr této velikosti a σ_g jeho odchylka



Obrázek 1 Distribuční křivka koloidní soustavy mají 19 frakcí různě velikých částic.(3)

2.1.3. Klasifikace koloidních soustav

Stejně jako disperzní soustavy lze i koloidní soustavy třídit do několika skupin podle různých kritérií. Je-li klasifikačním kritériem skupenský stav disperzní fáze a disperzního prostředí, lze koloidní soustavy rozdělit do osmi skupin (tab.2). Obecně lze koloidní soustavy označit jako *soly*, předpona *aero* (*aero* = vzduch) pak označujeme *soly* s plynným disperzním prostředím a předpona *lyo* (*lyo* = rozpouštědlo) označuje *soly* s kapalným disperzním prostředím. [5]

disperzní prostředí	disperzní fáze	označení koloidní disperze
plynné	plynný	netvoří koloid
	kapalný	aerosoly
	pevný	aerosoly
kapalné	plynný	pěny
	kapalný	emulze
	pevný	lyosoly
pevné	plynný	tuhé pěny
	pevný	tuhé emulze
	pevný	tuhé soly

Tabulka 2 Klasifikace koloidních soustav dle fázového složení [6,7]

Koloidní soustavy tvořené kapalným disperzním prostředím a pevnou disperzní fází (lyosoly) lze dále klasifikovat dle vlastností fázového rozhraní. Prakticky lze takto vytvořit tři skupiny koloidních soustav. Soustavy s ostře vymezeným fázovým rozhraním obecně nazýváme jako *soustavy lyofilní*. Lyofilní koloidy jsou ve většině případů tvořeny anorganickými látkami, nevznikají samovolně a bez dostatečné stabilizace jsou termodynamicky nestálé. Je-li disperzní prostředí tvořeno vodou, označujeme lyofobní soustavu jako hydrofobní a je-li tvořeno organickou kapalinou, označujeme je jako *organosoly*. Lyofilní koloidní soustavy jsou většinou tvořeny vysokomolekulárními látkami, vznikají samovolným rozpouštěním a jsou termodynamicky stabilní – proto se často označují jako *koloidní roztoky*. Hydrofilní koloidní soustavy označujeme takovou soustavu, u které je disperzní prostředí tvořeno vodou. Třetí skupinou koloidních soustav patřících mezi lyosoly jsou *asociativní koloidní soustavy*, které vznikají spojováním molekul povrchově aktivních látek v útvary koloidní velikosti. Asociativní koloidy nemají pevně definované fázové rozhraní, protože dochází k neustálé výměně molekul povrchově aktivní látky mezi koloidní částicí a disperzním prostředím. Zvláštním případem koloidních soustav, které mají schopnost přecházet z kapalné formy do pevného stavu nazýváme *gely*. Tvořit gely mohou některé lyofobní a celá řada lyofilních koloidů, jejichž částice mají za určitých podmínek schopnost spojovat se a vytvářet pevné trojrozměrné síťové struktury.[5]

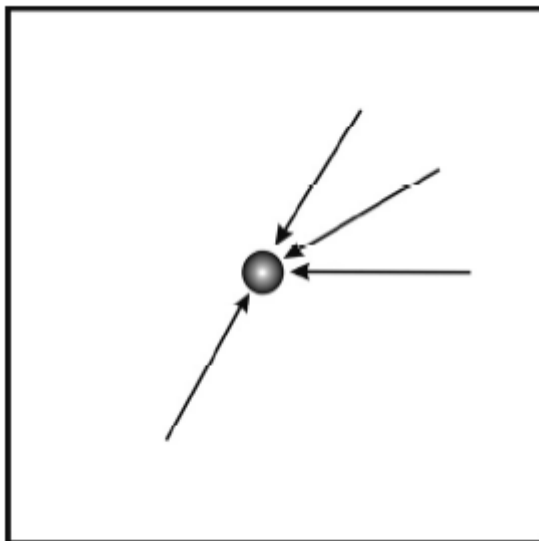
2.2. Kinetické vlastnosti disperzních soustav

Následující kapitola se zabývá kinetickými vlastnostmi disperzních soustav. Její jednotlivé složky totiž významně ovlivňují vlastnosti koloidů a také stabilitu koloidních soustav.

Kinetické vlastnosti koloidů jsou hlavně spojeny s Brownovým pohybem, který následně ovlivňuje další kinetické vlastnosti např. difúze.

2.2.1. Brownův pohyb a jeho důsledky

Do koloidních částic narážejí vlivem tepelného pohybu molekuly disperzního prostředí a tyto nárazy mají za důsledek pohyb částic, který nazýváme „*Brownův pohyb*“. Tento pohyb je tím intenzivnější, čím jsou částice menší a čím je teplota vyšší. Je-li např. v disperzním prostředí částice o velikosti několika mikrometrů, obdrží v uvažovaném čase takové množství nárazů, že se jejich působení ve všech směrech navzájem vyruší, nehledě na jejich ohromnou setrvačnost ve srovnání s molekulami disperzního prostředí. Naproti tomu koloidní částice (obr.2) získá ve stejném časovém intervalu daleko menší počet nárazů. Potom je velmi málo pravděpodobné, že se jejich působení navzájem vyruší. Převládne výslednice v určitém směru a v tomto směru se částice pohybuje, dokud ji další nárazy molekul disperzního prostředí nevychýlí jiným směrem. Brownův pohyb se projevuje zejména v difúzi, sedimentaci a má značný vliv na stabilitu koloidních soustav.[8]

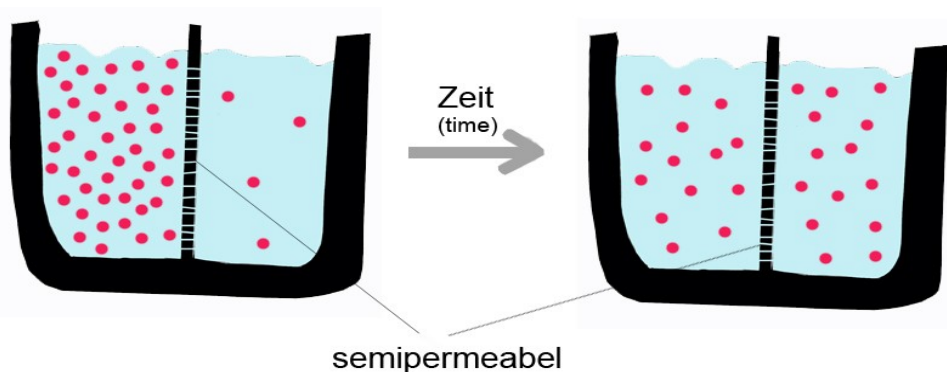


Obrázek 2 Nárazy molekul disperzního prostředí do koloidní částice

2.2.2. Difúze

Difúze je projevem Brownova pohybu. Základní hnací silou je rozdíl chemických potenciálů difundující látky (tedy rozdíl koncentrací – koncentrační

gradient) v různých částech soustavy. Směr difúze je vždy ve směru koncentračního gradientu – z prostředí o vyšší koncentraci do prostředí s nižší koncentrací se snahou vyrovnat se koncentraci v celém systému (tedy se snahou dosáhnout rovnováhy). Difúzi v podstatě rozumíme samovolné pronikání částic jedné látky mezi částice druhé látky téhož skupenství, pokud je uvedeno do vzájemného styku (obr.3). [9]



Obrázek 3 Princip difúze [10]

kde *zeit, time* znamená čas a *semipermeabel* znamená polopropustná

2.2.3. Elektroforéza

Elektroforéza patří mezi elektromigrační separační metody. Principem těchto separačních metod je využití rozdílné pohyblivosti nabitých částic v elektrickém poli k jejich separaci.

Princip elektroforézy tedy spočívá v přenosu elektricky nabitých částic ve stejnosměrném elektrickém poli. Toto elektrické pole se vytváří vkládáním konstantního stejnosměrného napětí mezi elektrody. Velikost nabitých částic může být různá, od jednoduchých iontů přes makromolekuly až po koloidní částice a částice suspenzí a emulzí. Používá se k separaci vzorků biologického původu, např. bílkovin v biochemii.

Elektroforetická pohyblivost určité nabité částice je její rychlost pohybu v elektrickém poli o jednotkové intenzitě. Jsou-li na začátku separace částice v jednom místě, pak během separace se dostávají dopředu ty nabité částice, které mají větší pohyblivost a opoždějí se částice s menší pohyblivostí. Tím dochází k jejich oddělení.

V koncentrovaných roztocích je rychlost částice omezována dvěma jevy:

- **Elektroforetický efekt** – každá nabitá částice má kolem sebe solvatační obal. Je-li v roztoku vysoká koncentrace iontů, strhává pohyb iontů se solvatačním obalem okolní kapalinu a vyvolává její hydrodynamický tok.
- **Relaxní (asymetrický) efekt** – nabitá částice se nachází ve středu svého solvatačního obalu. Pohybem se tato nabitá částice dostává mimo její střed. Dříve než se vytvoří nový obal, původní přitahuje svou nabitou částici opačným směrem zpět do svého středu, v němž je opačný náboj než nese ion.

V roztocích slabých elektrolytů jsou vedle sebe disociovány (nabité) a nedisociované (nenabité) molekuly. Podíl nabitých částic je určen stupněm disociace. Molekula takového elektrolytu proto vykazuje efektivní pohyblivost. Disociaci slabých kyselin a zásad lze měnit volbou pH prostředí a tím také ovlivňovat separaci těchto látek.[11]

2.2.4. Osmóza

Osmóza je pohyb molekul vody přes selektivně propustnou membránu.[12] Při bližší specifikaci lze říct, že je pohyb vody přes selektivně propustnou membránu z oblasti vysokého vodního potenciálu (nízká koncentrace rozpuštěných látek) do oblasti nízkého vodního potenciálu (vysoká koncentrace rozpuštěných látek). Slovo osmóza lze také použít k popsání fyzikálního procesu, kde se molekuly rozpouštědla pohybují přes polopropustnou membránu (bez přísunu energie)[13], protože částice větších rozměrů neprojdou jejími póry. V nejjednodušším případě při osmóze dochází k vyrovnání koncentrací mezi roztokem a čistým rozpouštědlem, což vede k toku rozpouštědla směrem do roztoku, tedy směrem opačným, než normálně probíhá difúze rozpuštěné látky. Hnací silou tohoto pohybu molekul rozpouštědla je osmotický tlak, označovaný obvykle řeckým písmenem π a měřených v Pa. Tento tlak lze změřit stanovením protitlaku, jímž právě zabráníme pronikáním molekul rozpouštědla do roztoku a tím zředování roztoku.[3]

2.2.5. Sedimentace

Sedimentace je proces separace tuhých částic od kapaliny, vyvolaný působením gravitačního zrychlení. Teorie tohoto procesu však vychází ze zákonitostí odvozených

pro pohyb izolovaných částic v klidné kapalině. V praxi se ovšem mnohem častěji setkáváme se suspenzemi, tvořenými soustavou tuhých částic.[14]

Koloidní částice se vlivem působení gravitační síly F_g pohybují ve směru působení síly – sedimentují. Pohyb částic v gravitačním poli závisí na jejich hmotnosti, tvaru a hustotě a závisí také na vlastnostech prostředí, ve kterém se částice pohybují. Proti každé pohybující se kulové částici v kapalině pod vlivem gravitační síly F_g působí jako vztlaková síla $F_{vztl.}$, tak viskozitní odpor $F_{vis.}$, který lze vyjádřit Stokesovým vztahem:

$$F_g = F_{vztl} + F_{vis}$$

Gravitační sílu lze s ohledem na vztlakovou sílu vyjádřit následovně:

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) g \quad (3)$$

Pro technologické účely a zajištění vhodného technologického postupu odstranění částic je nutné znát jejich velikost. Pro stanovení velikosti částic existuje celá řada metod:

- a) **Mechanické třídění částic** – síťová analýza
- b) **Optické metody** – optická a elektronová mikroskopie, metody založené na rozptylu světla, turbidimetrické metody.
- c) **Sedimentační metody** – analýza v gravitačním poli, analýza v odstředivém poli.
- d) **Ostatní metody** – fotonová korelační spektroskopie, laserová difrakce.[15]

2.3. Reologické vlastnosti disperzních soustav

Reologie se zabývá obecnými mechanickými vlastnostmi látek, vztahy mezi napětím, deformacemi a rychlostí deformace. Zabývá se také tokem hmoty vlivem napětí, které na ně působí. Existují tři typy chování hmoty:

- Elastické chování – po ukončení silového působení deformace vymizí a hmota se navrácí do původního stavu.
- Viskózní chování – hmota teče vlivem působení sil (nevratná deformace) a je-li silové působení odstraněno, tok se zastaví.
- Viskelastické chování – odezva hmoty na působení síly závisí na době působení.[16]

2.3.1. Viskozita kapalin

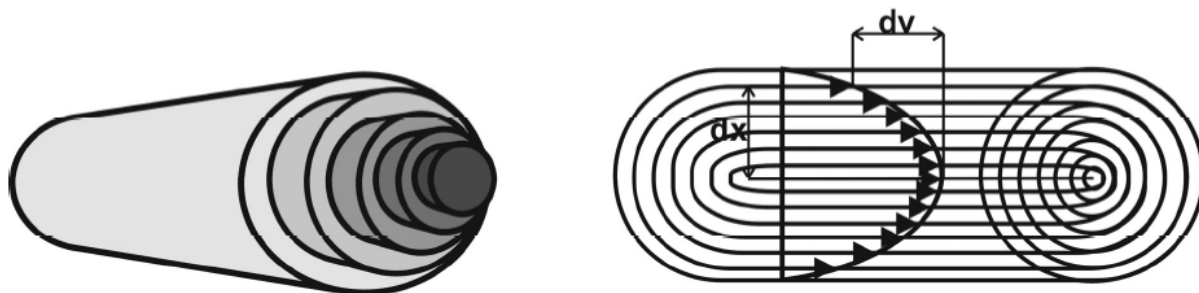
V reálné kapalině existuje smykové napětí na stykové plošce dvou po sobě se pohybujících rovnoběžných vrstev kapaliny, tedy v reálné kapalině existuje tření (viskozita). Toto smykové napětí (smykové napětí je tečná síla, která působí ve směru rychlosti prostředí na malou plochu rovnoběžnou s rychlostí, dělená velikostí této plochy) je přímo úměrné přírůstku rychlosti na jednotku délky, ve směru kolmé ploše v níž smykové napětí působí.[17] Každá pohybující se částice má svou rychlost a směr, které se mohou v závislosti na místě a čase měnit. Při malých rychlostech pohybu částic a současně při vyšších intenzitách mezimolekulových přitažlivých sil se směr pohybu částic příliš nemění a kapalina se pak pohybuje ve vrstvách - *laminární proudění* (obr.4). Naopak pohybuje-li se částice kapalin vyšší rychlostí a mezimolekulové přitažlivé síly jsou slabé, dochází ke změnám směru pohybu částic a při proudění kapaliny vznikají víry. Takovéto proudění nazýváme jako *turbulentní*. [3]

Základní popis viskózního chování kapaliny vychází z Newtonova zákona viskózního toku:

$$F = -\eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dx}$$

kde d_v/d_x je gradient rychlosti, η je dynamický viskózní koeficient, S je plocha vrstvy, na kterou působí síla F .

Při laminárním toku kapaliny v trubici se rychleji pohybují vrstvy kapaliny blíže ke středu trubice. Při toku kapaliny dochází k přeskupování molekul, kterému však brání mezimolekulové přitažlivé síly (vnitřní tření v kapalinách). Projevuje se brzdícími účinky v tekoucí kapalině nebo odporem, který kapalina klade pohybujícímu se tělesu. Tuto vlastnost kvantitativně popisujeme veličinou *dynamická viskozita* η . Podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny se nazývá jako *kinetická viskozita* η_{kin} . [3]

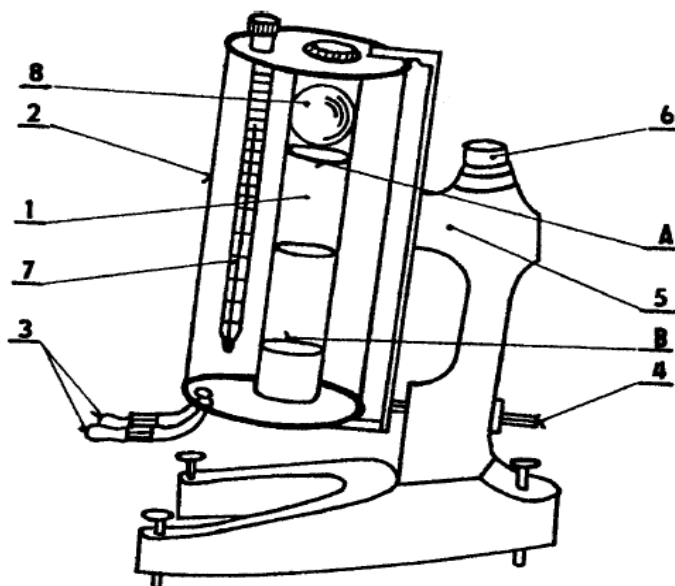


Obrázek 4 Tok kapaliny trubicí ve vrstvách (3)

Měření viskozity je možné několika metodami a několika různými přístroji jako je Stokesův viskozimetr, Dopplerův viskozimetr, Průtokový viskozimetr atd. Jejich volba pro daný účel měření je závislá na mnoha okolnostech.[18].

Stokesův viskozimetr (obr.5) je skleněný válec naplněný zkoumanou kapalinou. Je opatřen teploměrem a otvorem pro vhazování kuličky. K určení dynamické viskozity je třeba znát následující veličiny: hustotu kuličky, hustotu oleje při dané teplotě, poloměr kuličky a její rovnoměrnou rychlost v oleji. K určení hustoty je třeba určit hmotnost a poloměr kuličky (vážením na analytických vahách, mikrometrickým šroubem). K zjištění

rychlosti je třeba měřit čas, za který urazí kulička v oleji známou dráhu. Je nutno si ověřit, je-li pohyb kuličky blízky rovnoměrnému přímočarému pohybu.[17].



1 - měrná trubice viskozimetru (naplněná měřenou kapalinou), 2 - termostatický skleněný plášť viskozimetru, 3 - přípojky k termostatu, 4 - aretační kolík, 5 - otočný čep, 6 - libela, 7 - teploměr, 8 - měřicí tělísko, A, B - horní a dolní ryska (viz.text)

Obrázek 5 Stokesův viskozimetr (18)

2.3.2. Viskozita koloidních soustav v kapalném disperzním prostředí

Přítomnost velkých částic disperzní fáze obvykle významně mění viskózní chování kapalného disperzního prostředí. Mimo změny charakteru proudění v kapalině je nejpozorovatelnější změnou růst její viskozity. Proto se pro popis viskózního chování koloidních soustav užívá jiných vyjádření viskozity, než u čistých kapalin:

- Relativní viskozita – poměr viskozity disperzního systému nebo roztoku k viskozitě čistého disperzního prostředí nebo rozpouštědla.

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0}$$

- Specifická viskozita – veličina, která vyjadřuje vzrůst viskozity disperzního prostředí v důsledku přítomnosti disperzního podílu.

$$\eta_i = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \eta_{rel} - 1$$

- Inherentní viskozita – veličina, která vyjadřuje odlišnost viskozity disperzního systému od viskozity disperzního prostředí jako přirozený logaritmus relativní viskozity dělený koncentrací disperzního podílu (hmotnost v jednotce objemu, objemový zlomek, ve starší literatuře gramy na 100ml roztoku).

$$\eta_{inh} = \frac{\ln \eta_{rel}}{w_2}$$

- Redukovaná viskozita – veličina, která vyjadřuje odlišnost viskozity disperzního systému od viskozity disperzního prostředí jako inkrement relativní viskozity dělený koncentrací disperzního podílu.

$$\eta_{red} = \frac{\eta_i}{w_2}$$

- Viskózní číslo – hodnota redukované a inherentní viskozity při nulové koncentraci disperzního podílu, získaná extrapolací koncentrační závislosti těchto veličin.

$$[\eta] = \lim_{w_2 \rightarrow 0} \eta_{red} = \lim_{w_2 \rightarrow 0} \eta_{inh} \quad [19]$$

kde η je dynamická viskozita, η_0 je viskozita čistého disperzního prostředí a w_2 je hmotnostní koncentrace disperzní fáze.

Kapaliny, které se chovají podle Newtonova zákona se nazývají *newtonovské*. Mezi ně patří běžné čisté kapaliny a pravé roztoky. Kapaliny, u nichž se mění viskozita se změnou působící síly, se označují jako *nenewtonovské*. Příkladem takovýchto kapalin jsou koloidní disperze, emulze nebo suspenze. Nenewtonovské chování platí zejména pro koncentrované disperze a disperze výrazně asymetrických částic. Viskozita takovýchto disperzí buď narůstá nebo klesá s rostoucím rychlostním gradientem.

Reologické vlastnosti koloidních soustav jsou často závislé na době působení vnější síly. U některých disperzních systémů při smykovém namáhání dochází k poklesu viskozity za určitý čas od počátku působení síly. Je-li pak systém ponechán v klidu, dojde k obnovení původně vysoké viskozity. Tento jev se nazývá *tixotropie* a je např. využíván v průmyslu barev – při natírání je barva tekutá (pokles viskozity), ponechá-li se v klidu, ztuhne (nárůst viskozity). Opačný jev se nazývá *reopexie*. [3]

2.4. Optické vlastnosti koloidních soustav

K význačným vlastnostem disperzních soustav patří jejich charakteristické optické vlastnosti. Při prostupu světla disperzním systémem se intenzita světelných paprsků zmenšuje v důsledku:

- **Pravé absorpce** – při které pohlcené záření zvýší vnitřní energii molekul systému a přemění se v teplo.
- **Rozptylu světla** – na částicích systému, při čemž je záření opět emitováno ve formě světelné energie.

Velikost obou těchto efektů závisí na charakteru disperzního systému i na vlnové délce světla. U analyticky disperzních systémů se uplatňuje převážně pravá absorpce, zatímco v disperzních systémech, které obsahují částice koloidních nebo větších rozměrů, se uplatňuje rozptyl světla. [20]

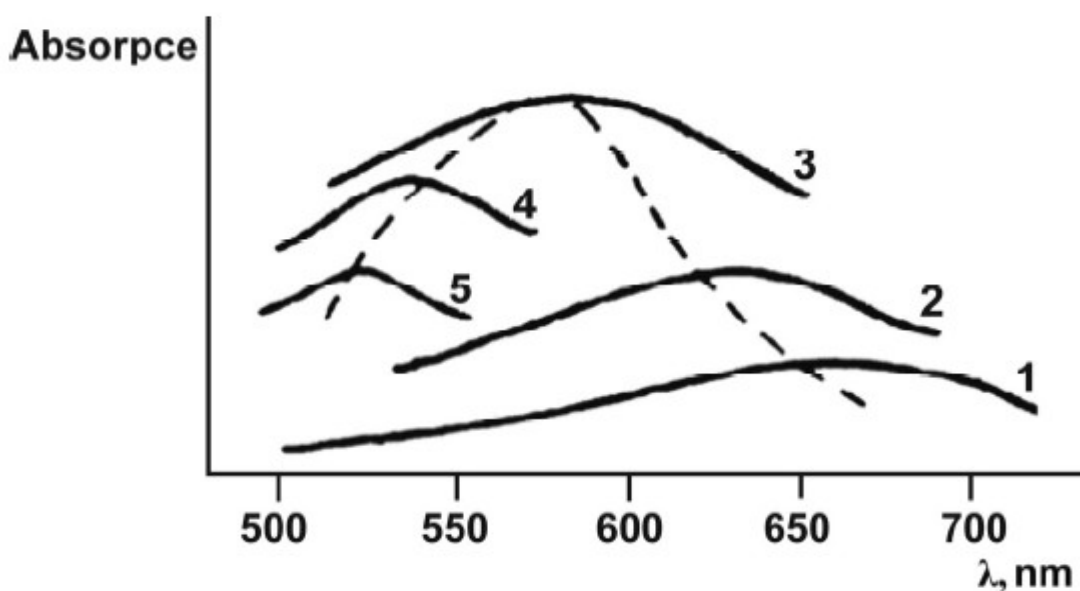
Z jevů spojených s interakcí světla s koloidními soustavami poskytují nejvíce informací rozptyl a adsorpce záření, proto se dále budeme zabývat pouze těmito jevy. [5]

2.4.1. Absorpce záření

Při absorpci záření hmotou dojde k pohlcení energetického kvanta elektromagnetického záření, což má za následek změnu energetických stavů valenčních a vazebných elektronů. Absorpcí záření tedy dochází ke zvýšení vnitřní energie molekul systému, která se přemění v energii tepelnou. Absorpci světla látkou se zabývá Lambert – Beerův zákon:

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = \varepsilon cd$$

kde I je intenzita prošlého záření látkou, I_0 je intenzita dopadajícího světla na látku, ε je absorpční koeficient, c je koncentrace látky a d je tloušťka vrstvy, kterou prochází paprsek. Lambert-Beerův zákon je však u koloidních soustav komplikován již zmíněnou závislostí absorpce záření na velikosti částic disperzní fáze, což lze pozorovat zejména u elektricky vodivých koloidních částic. Typickým příkladem takového chování je sol zlata (obr.6).[3]

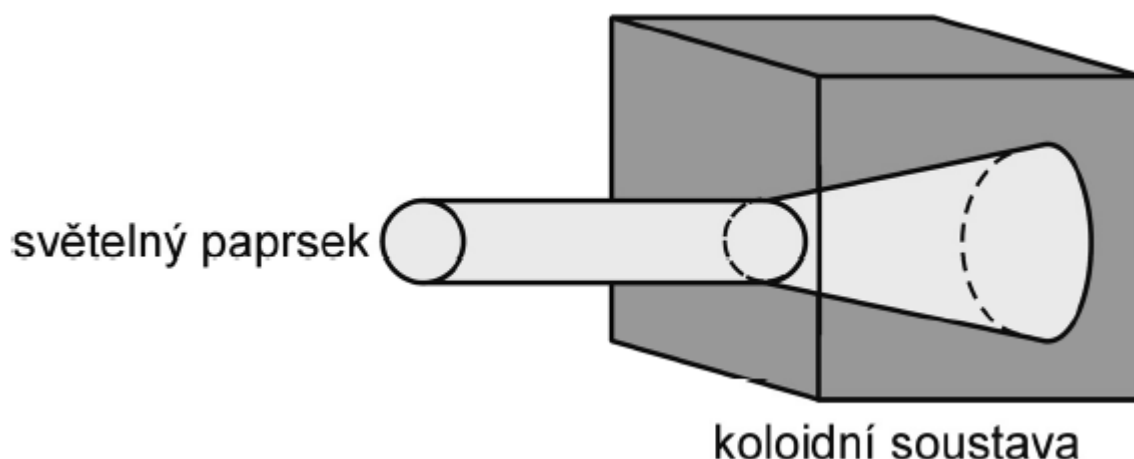


Obrázek 6 Absorpční spektra solů zlata měnící se s narůstajícím stupněm disperzity solu.[3]

2.4.2. Rozptyl záření

U rozptylu záření na rozdíl od absorpce nedochází při pohlcení kvanta světelné energie ke změně energetických stavů valenčních elektronů, ale kvantum přijaté energie je následně vyzářeno náhodně všemi směry beze změny vlnové délky. Tento efekt lze v podstatě nazvat jako elastický odraz fotonu od částice. Rozptyl záření je složitý jev, který zahrnuje podle okolností odraz, lom, ohyb a interferenci světla.

Rozptyl světla byl poprvé kvalitativně pozorován v 17.století Tyndallem, po němž byl pojmenován efekt rozšiřujícího paprsku (kužele) procházejícího disperzním prostředím (obr.7).[3]

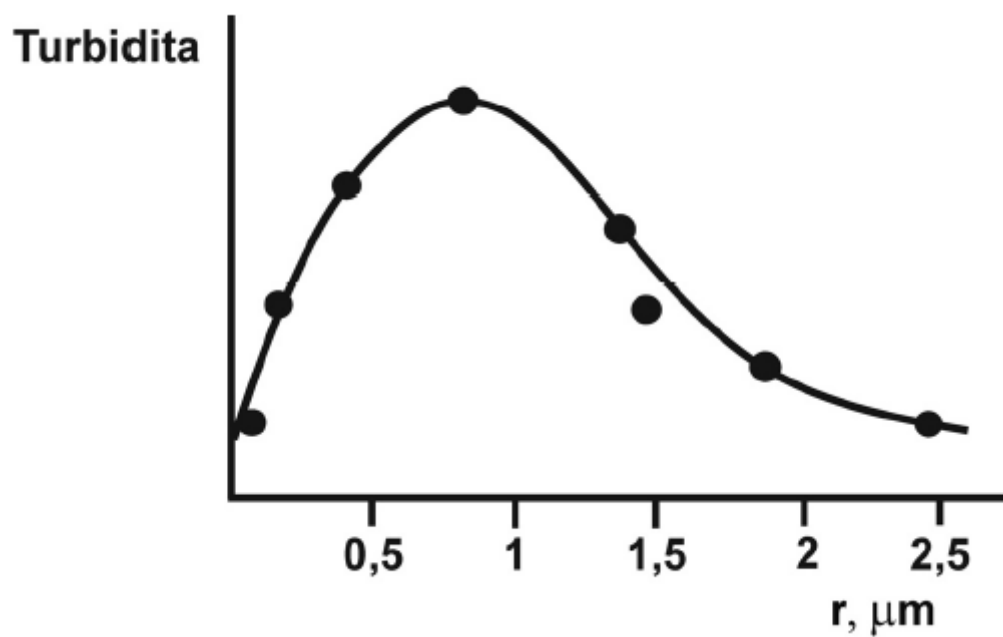


Obrázek 7 Tyndallův jev

Mechanismus rozptylu záření spočívá v indukci elektrického dipólu v částici vlivem elektromagnetického pole dopadajícího záření, přičemž tento indukovaný dipól emituje záření o stejné vlnové délce jako mělo záření dopadající. Mimo to dochází také k částečné polarizaci odraženého světelného paprsku. Kvantitativně se podíl rozptylu světla zeslabí intenzitu na dopadajícího záření ve směru pozorování popisuje zákonem obdobným Lambert-Beerovu:

$$-\log \frac{I}{I_0} = \tau d$$

kde τ je turbidita soustavy. Turbidita je mírou úhrnné energie, která se při průchodu světelného paprsku vrstvou suspenze o jednotkové tloušťce rozptýlí na všechny strany od tohoto paprsku. Turbidita je značně závislá na stupni disperzity (obr.8), na vlnové délce dopadajícího záření a na optických vlastnostech koloidní soustavy.[3]



Obrázek 8 Závislost rozptylu světla na stupni disperzity (r je poloměr částic) v suspenzi $\text{BaSO}_4(3)$

3. Vliv viskozity prostředí na stabilitu měření velikosti částic a Zeta potenciálu

Tato kapitola se zabývá především pojmu zeta potenciál, jeho charakteristice, způsobu měření a vyhodnocení. Dále se zde uvádí co je stabilita disperzních soustav.

3.1. Charakteristika Zeta potenciálu

Zeta potenciál je široce využíván pro určení velikosti elektrického náboje na povrchu dvojvrstvy.[21] Zeta potenciál je parametr charakteristický pro popis chemie povrchu pevných materiálů. Generuje se na rozhraní mezi povrchem pevné látky a okolní kapalinou. Jedná se o potenciál na tzv. pohybovém rozhraní, tj. na rozhraní mezi přilínající vrstvou a ostatní kapalinou. Zeta potenciál reprezentuje povrchový náboj, který vzniká za přítomnosti vodného roztoku, kde dochází k disociaci funkčních skupin hydrofilních povrchů a nebo k adsorpci anionů na hydrofobní povrch. Změna pH kapaliny ovlivňuje rovnováhu mezi procesy disociace a adsorpce a umožňuje zkoumat chemické vlastnosti povrchu. Zeta potenciál je parametr běžně používaný v koloidní chemii a v případě suspenzí je rozhodujícím parametrem pro stabilitu nebo koagulaci. U koloidních disperzí se Zeta potenciál stanovuje pomocí elektroforetických nebo elektroakustických metod, které měří pohyb nabitých částic v elektrickém poli. [22]

Znaménko Zeta potenciálu je opačné než znaménko iontů vnější vrstvy elektrické dvojvrstvy. Nebývá vyšší než 0,1V. Značně je ovlivňován přidavkem elektrolytů a to i v malých koncentracích.[19].

3.1.1. Elektrická dvojvrstva

Útvar složený ze dvou opačně nabitých vrstev, který se vytváří při styku nabitého povrchu tuhé látky s roztokem elektrolytu. Nabitý povrch tuhé látky tvoří *vnitřní vrstvu*, k níž jsou elektrostatickými a adsorpčními silami přitahovány ionty převážně opačného znaménka (protiionty), jejichž náboj neutralizuje náboj povrchu – *vnější vrstva*. Pro popis tohoto uspořádání byly vytvořeny různé modely elektrické dvojvrstvy (Helmholtzův, Gouyův-Chapmanův, Sternův).[19]

3.1.2. Metody měření zeta potenciálu

Měření zeta potenciálu lze provést dvěma základními metodami:

- **Elektroforetické metody** – když je na elektrolyt aplikované elektrické pole, nabitě částice suspendované v elektrolytu jsou přitahovány směrem k elektrodě s opačným nábojem. Viskózní síly, působící na částice, mají sklon bránit tomuto pohybu. Když se dosáhne rovnováha mezi těmito dvěma protichůdnými silami, částice se pohybují s konstantní rychlostí.

Rychlost částice je závislá na následujících faktorech:

- Síla elektrického pole nebo gradient napětí
- Dielektrická konstanta media
- Viskozita media
- Zeta potenciál

Rychlost částice v elektrickém poli se obvykle označuje jako její *elektroforetická pohyblivost*.

Díky těmto znalostem můžeme získat Zeta potenciál částice aplikováním **Henryovy rovnice**:

$$U_E = \frac{2\varepsilon z f(ka)}{3\eta}$$

kde z je zeta potenciál, U_E elektroforetická pohyblivost, ε dielektrická konstanta, η viskozita, $f(ka)$ Henryova funkce.

Pro $f(ka)$ se obecně používají jako aproximace dvě hodnoty:

- Smoluchovskioho aproximace – o hodnotě 1,5
 - Huckelova aproximace – o hodnotě 1, zejména pro nevodná měření[23]
- **Metoda proudového potenciálu** – kapalina se pohybuje s ohledem na pevnou látku. Pevná látka je ve formě pórů pevně spojena se speciálním držákem. Proudový potenciál se měří na hranici tohoto spojení.

Některé alternativy této metody existují pro měření zeta potenciálu vláknitých nebo lamelových materiálů.[24]

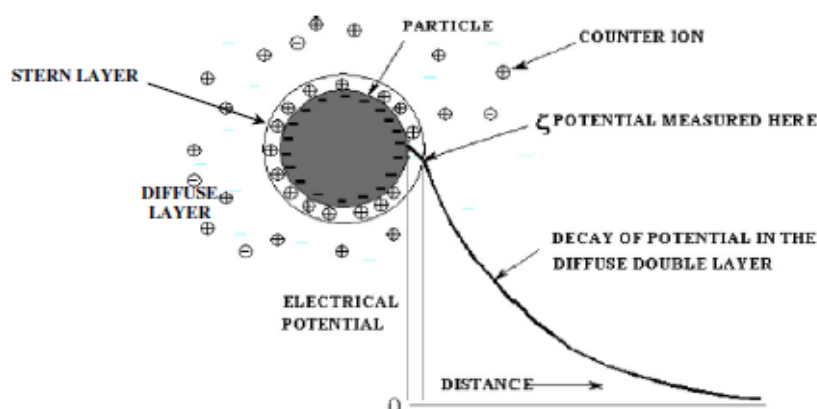
Přístroje na měření zeta potenciálu mohou být také použity nejenom na měření tohoto potenciálu, ale také k měření velikosti částic, jako příklad uvádím přístroj Zetasizer Nano. Ovšem je nutno podotknout, že velikost těchto částic musí být ve velikosti spíše desetin a jednotek mikrometrů. Při velikosti částic desítek až stovek mikrometrů není přístroj schopný částice změřit.

Měření velikosti částic přístrojem Zetasizer Nano funguje na principu použití procesu nazývaného „*dynamický rozptyl světla*“, který měří Brownův pohyb a dává ho do vztahu s velikostí částic. To provádí osvětlením částic laserem a analyzováním fluktuací intenzity v rozptýleném světle.[20]

3.1.3. Vliv Zeta potenciálu na stabilitu koloidní disperze

Význam Zeta potenciálu spočívá v tom, že jeho hodnota úzce souvisí se stabilitou koloidní disperze (např. multivitamin sirup). Zeta potenciál indikuje stupeň odporu mezi přilehlými, shodně nabitými částicemi (vitamíny) v disperzi. Pro molekuly a částice, které jsou dostatečně malé, vysoká hodnota Zeta potenciálu bude zachovávat stabilitu, tj. roztok nebo disperze se bude bránit agregaci.

Pokud potenciál nabývá malých hodnot, přitažlivost přesahuje odpor a rozptyl se poruší, a dochází k flokulaci (vyvločkování). Takže, koloidy s vysokým Zeta potenciálem (kladným nebo záporným) jsou elektricky stabilizovány, dokud koloidy s nízkým Zeta potenciálem mají tendenci se srážet nebo vyvločkovat.



Obrázek 9 Rozpad elektrostatického potenciálu v blízkosti koloidu

kde *stern layer* znamená vrchní vrstva, *diffuse layer* znamená difuzní vrstva, *electrical potential* znamená elektrický potenciál, *particle* znamená částice, *counter ion* znamená opačný iont, *zeta potential measured here* označuje místo měření zeta potenciálu, *decay of potential in the diffuse double layer* je rozpad potenciálu v difuzní dvojvrstvě a *distance* je vzdálenost. [25]

Zeta potenciál [mV]	Stabilita chování koloidů
od 0 do ± 5	Rychlá koagulace a flokulace
od ± 10 až ± 30	Počínající nestabilita
od ± 30 až ± 40	Střední stabilita
od ± 40 až ± 60	Dobrá stabilita
více než ± 61	Vynikající stabilita

Tabulka 3 Stabilita chování koloidů [19]

Hodnota 30 mV (pozitivní nebo negativní) může být brána jako libovolná hodnota, která odděluje nízko-nabitě povrchy od vysoce-nabitých povrchů. [19]

Dělicí čarou mezi stabilitou a nestabilitou vodné disperze se obvykle uvádí buď 30 mV nebo -30 mV.

Částice, jejíž hodnota Zeta potenciálu je více pozitivní než 30 mV jsou obvykle považovány za stabilní.

Částice, jejíž hodnota Zeta potenciálu je více negativní než -30 mV jsou obvykle považovány rovněž za stabilní. [26]

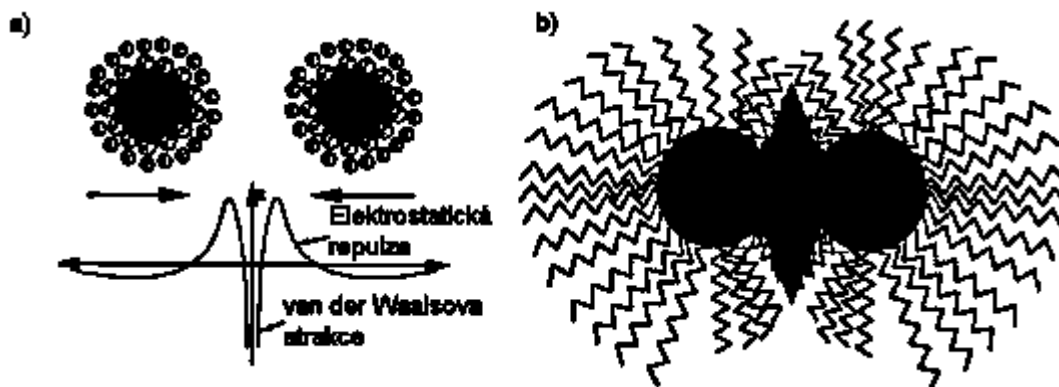
Zvláštním případ nastává při nulové velikosti Zeta potenciálu. Tento jev se nazývá *Izoelektrický bod*. Izoelektrický bod je taková hodnota pH roztoku, v němž se anion nepohybuje v elektrickém poli. To znamená, že jeho volný náboj je zde nulový. Izoelektrický bod lze určit pro každý anion. Jeho hodnota se liší s druhem použitého pufru, v němž se provádí elektroforéza.

Pokud je hodnota pH nižší, molekula získává celkově kladný elektrický náboj. Pro hodnoty pH vyšší je náboj molekuly celkově záporný.[27]

3.2. Stabilizace koloidních částic

Pod pojmem stabilita disperzních soustav, se rozumí jejich schopnost bránit se průběhu procesů vedoucích ke změně jejich struktury, stupně disperzity, charakteru rozdělení částic podle rozměrů. Lze rozlišovat sedimentační a agregátní stálost disperzních soustav. Sedimentační stálost představuje stabilitu soustavy vůči snížení potenciální energie částic disperzní fáze při jejich sedimentaci působením gravitační síly. Agregátní stálost představuje schopnost soustavy klást odpor procesům, které vedou ke snížení Helmholtzovy energie rozhraní částic disperzní fáze s disperzním prostředím.[28]

Jednou z hlavních charakteristik koloidních částic je jejich mála velikost. Bohužel jsou tyto koloidní částice např. kovové nanočástice, nestálé z důvodů agregace, což vede ke vzniku hrudek. Ve většině případů má agregace za následek ztrátu vlastností spojovaných s koloidním stavem těchto částic. Např. koagulace během katalýzy vede k podstatné ztrátě katalytických aktivity. O stabilitě koloidů a nanoklastrů už bylo napsáno několik obecných článků. Stabilizace nanoklastru je obvykle dělena na elektrostatickou a stérickou vrstvu.(obr.10)



Obrázek 10 a) elektrostatická stabilizace b) stérická stabilizace koloidů kovů

Další možností je definovat čtyři typy stabilizačních mechanismů, jimiž jsou:

- Elektrostatická stabilizace povrchově absorbovatelnými aniony
- Stérická stabilizace přítomností velkých funkčních skupin
- Kombinace těchto dvou mechanismů s elektrosterickou stabilizací
- Stabilizace ligandem nebo rozpouštědlem

Elektrostatická stabilizace

Iontové sloučeniny, jako jsou halogenidy, karboxyláty nebo polyoxoanionty rozpuštěné v roztoku (většinou vodném), mohou způsobovat elektrostatickou stabilizaci. Adsorpce těchto sloučenin a jejich odpovídající protiionty na povrchu kovu vytvoří elektrickou dvojvrstvu okolo částic, což vyvolá elektrostatickou repulzi mezi částicemi. Pokud je elektrický potenciál dvojvrstvy dostatečně velký, potom elektrostatická repulze zabraňuje repulzi částic. Koloidní suspenze stabilizované elektrickou repulzí jsou velmi citlivé na jakékoliv vlivy, které ruší dvojvrstvu, jako je třeba iontová síla nebo teplota, takže kontrola těchto parametrů je nezbytná pro zajištění účinné stabilizace koloidů.

Účinnost elektrostatické stabilizace lze jednoduše zjistit změnou iontové síly roztoku, což lze například docílit přidáváním solí do roztoku. Při vytvoření takové iontové síly roztoku, která rozruší elektrostatickou repulzi, dojde k agregaci nanočástic, která je doprovázena změnou vlnové délky plasmonové rezonance. Tento test je všeobecně rozšířen a kromě jiného slouží i k potvrzení změny elektrostatické stabilizace po modifikaci nanočástic.[29]

Stérická stabilizace

Využívá pro zabránění agregace kovových částic makromolekul, jako jsou polymery, blokové kopolymery, dendrimery nebo oligomery, které kolem nanočástic vytvoří ochrannou vrstvu. V porovnání s elektrostatickou stabilizací, která je většinou používána ve vodném prostředí, může být stérická stabilizace použita jak v organické, tak ve vodné fázi.

Elektrostérická stabilizace

Je to spojení elektrostatické a stérické stabilizace, která vzniká např. prostřednictvím iontových detergentů nebo organokovů. Tyto sloučeniny mají polární funkční skupinu umožňující generovat elektrickou dvojvrstvu a zároveň hydrofilní řetězec poskytující sférickou repulzi.[30]

Stabilizace ligandem nebo rozpouštědlem

Termín stabilizace ligandem byl vybrán proto, aby popsal použití tradičních ligandů ke stabilizaci koloidů přechodných kovů. Tato stabilizace je umožněna koordinací kovové nanočástice s ligandy jako jsou např. fosfiny, thioly a jejich deriváty a aminy.

Kromě toho bylo zjištěno, že nanočástice mohou být stabilizovány samotnými molekulami rozpouštědla. Výhody stabilizace rozpouštědlem jsou:

- Metoda je obecně aplikovatelná na soli kovů 4. až 11. skupiny periodické tabulky
- Metoda poskytuje neobvykle vysoké výtěžky koloidů kovů, které jsou snadno izolovatelné jako prášky
- Částice jsou téměř monodisperzní
- Syntéza je vhodná pro několikagramovou přípravu a může být snadno provedena i ve větším měřítku.[29]

Při stabilizaci je důležité, aby stabilizační molekuly byly dostatečně rozpustné v disperzním prostředí a zároveň byly schopny dostatečně pevné adsorpce na povrch částice. Ochranná účinnost závisí především na jejich chemických vlastnostech, stupni

disperzity, elektrickém náboji, teplotě[30] a také iontové síle disperzního prostředí[31]. V reálném prostředí je toto zanedbatelným faktorem. Zvýšením iontové síly se ztenčuje ochranný obal částic a dochází k nárůstu zeta potenciálu. To zvyšuje pravděpodobnost srážek částic a dochází k jejich spojování ve větší agregáty, které ztrácejí kinetickou stabilitu, snáze sedimentují a při transportu urazí menší vzdálenost. Podstatně větší negativní účinek pak mají dvoumocné ionty v porovnání s ionty jednomocnými.[32].

3.2.1. Vliv teploty a světla na změnu stability disperzní soustavy

Vodné disperze jsou v podstatě stabilní po dobu až 3 let, nicméně některé systémy podléhají gelaci. Pro posouzení nestability byl vědci připraven poloxamer *Compritol SLN*. Jehož stabilita byla zkoumána jako funkce skladovacího tepla, světla a uskladňovacího materiálu (silikonizované lahvičky ze skla o třídě kvalita číslo I.).

Obecně platí, že zavádění energie do systému (světlo, teplo) vede k růstu částic a následné gelaci. Tento proces byl doprovázen snížením zeta potenciálu z hodnoty přibližně 25 mV na hodnotu o velikosti 15 mV. Účinek skladovacího materiálu byl menší.

Na základě tohoto pokusu byly sestaveny ideální podmínky pro skladování systémů. Jako teplota se ukázala teplota 8°C, za přístupu minima světla (skladování ve tmě) a použití silikonovaných lahviček jako skladovacího materiálu.[33]

4. Experimentální studium viskozity vybraných roztoků

Následující kapitola je věnována viskozitě jednotlivých chemických látek, které byly použity jako přídavek k jednotlivým vybraným vzorkům a destilované vodě. Jako vhodné přídavky jsme použili Chlorid vápenatý a Polyfosforečnan sodný. Rovněž zde uvádím pH daných chemických látek. Viskozita i pH poměrně výrazně ovlivňují chemické složení systému a to pak dále ovlivňuje velikost konduktivity. Konduktivita jako fyzikální veličina nám určuje schopnost látky vést elektrický proud. Se změnou konduktivity dochází i ke změně zeta potenciálu částic. Jak je tedy vidět jednotlivé veličiny se navzájem velmi ovlivňují a to je podstata mé praktické části bakalářské práce. Kdy pomocí řady měření zjistíme za jakých podmínek jsou různé vzorky v daném prostředí nejstabilnější.

4.1. Měření pH

Měření pH bylo prováděno na pH metru Merci pH/Cond 340i. Postupně bylo analyzováno pH samostatné destilované vody a dále pak Polyfosforečnanu sodného a Chloridu vápenatého. Tyto dvě chemické látky byly v tuhém skupenství a proto se museli před měřením rozpustit v destilované vodě (tabulka 4). Další série měření byla prováděna ve vodném roztoku směsi destilované vody, přídavku (Polyfosforečnan sodný, Chlorid vápenatý) a vzorku vybrané pevné látky. Jako pevné vzorky byly zvoleny Uhelný kal, Kalcit, Popílek a Černé uhlí z oblasti Paskova. Takto vzniklou směs jsme poté homogenizovali a provedli měření na pH metru. Výsledky jsou přehledně zobrazeny v tabulce 5.

MĚŘENÍ pH - JEDNOTLIVÉ LÁTKY	
Vzorek	pH
Destilovaná voda	6,82
Polyfosforečnan sodný	4,53
Chlorid vápenatý	8,68

Tabulka 4 Hodnoty pH jednotlivých látek

MĚŘENÍ pH - SMĚS VZORKU A PŘÍDAVKU		
	Polyfosforečnan sodný	Chlorid vápenatý
Uhlí Paskov	4,72	8,84
Uhelný kal	4,33	4,7
Popílek	5,21	9,75
Kalcit	5,62	8,1

Tabulka 5 Hodnoty pH u směsi destilované vody, vzorku a přídatku

V tabulky 4 můžeme pozorovat, že Polyfosforečnan sodný má pH v kyselé oblasti a Chlorid vápenatý má pH v oblasti zásadité. Při přidání jednotlivých vzorků můžeme pozorovat změnu v hodnotě pH. Různé kombinace přídatků a vzorků mění pH různým způsobem, což jak již bylo zmíněno, mění spolu s viskozitou chemické složení systému.

Z tabulky 5 je dále zřejmé, že Polyfosforečnan sodný, při smíchání s jednotlivými vzorky, má silnější kyselý charakter než Chlorid vápenatý. Rozdíl pH mezi Polyfosforečnanem sodným a Chloridem vápenatým je největší u popílku a naopak nejmenší změna byla pozorována u uhelného kalu.

4.2. Měření viskozity

Měření viskozity bylo prováděno v chemické laboratoři na vibračním viskozimetru SV-10, který má rozsah měření viskozity od 0,3 až po 10000 mPa*s⁻¹.

Před vlastním měřením viskozity bylo potřeba přístroj nakalibrovat na destilovanou vodu. Hodnota kalibrace destilované vody byla 0,97 mPa*s⁻¹ při teplotě 21,2°C Důležité u měření viskozity bylo potřeba také zaznamenat teplotu u všech měření. Měření viskozity bylo prováděno na vodném roztoku Polyfosforečnanu sodného a Chloridu vápenatého (tabulka 6). Každé měření bylo opakováno 3 krát. Tyto hodnoty jsou důležité pro měření zeta potenciálu na přístroji Zetasizer Nano. Kde velikost viskozity ovlivňuje zeta potenciál celého systému.

MĚŘENÍ VSKOZITY		
Číslo měření a teplota	Polyfosforečnan sodný	Chlorid vápenatý
1.měření	1,08 při 20,8°C	1,03 při 21,2°C
2.měření	1,08 při 20,6°C	1,02 při 21°C
3.měření	1,14 při 20,6°C	1,00 při 20,9°C

Tabulka 6 Měření dynamické viskozity vodného roztoku Polyfosforečnanu sodného a Chloridu vápenatého

Veškeré hodnoty dynamické viskozity jsou udávány v $\text{mPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Z tabulky dále vyplývá, že dynamická viskozita je o něco vyšší u Polyfosforečnanu sodného.

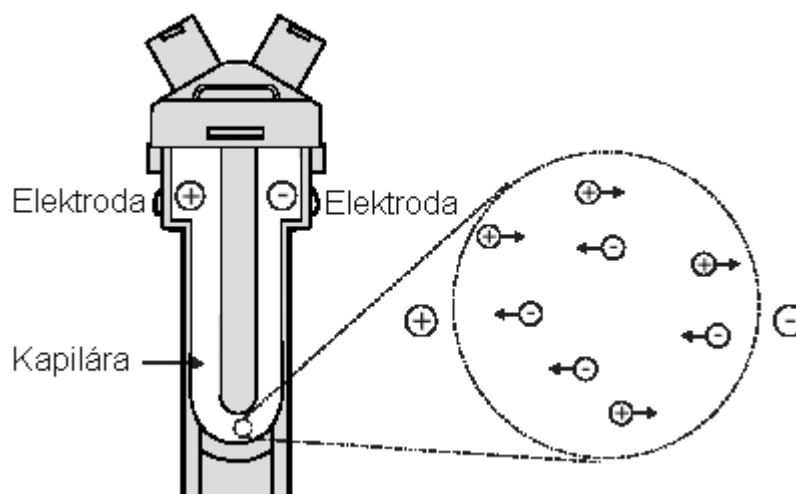
5. Vyhodnocení analytických dat

Jak už název kapitoly předznamenává, bude se zabývat hlavní částí mé bakalářské práce a to vyhodnocení dat, které jsem získal při měření zeta potenciálu jednotlivých vzorků. Také zde bylo prováděno určení velikosti částic, které bylo získáno měřením na přístroji Zetasizer Nano.

5.1. Měření zeta potenciálu

Měření zeta potenciálu bylo prováděno na přístroji Zetasizer Nano od firmy Malvern v laboratorním prostředí. Tento přístroj funguje na principu elektroforetické pohyblivosti a potom použití Henryho rovnice. Elektroforetická pohyblivost se získá provedením elektroforézy vzorku a změřením rychlosti částic a použitím *Laserové dopplerovy velocimetrie*.

Základem měření elektroforetické pohyblivosti je cela s elektrodami na každém konci, na které je aplikován potenciál. Částice se pohybují směrem k elektrodě s opačným nábojem (obr.11), jejich rychlost se měří a vyjádří se v jednotkách intenzity pole jako jejich pohyblivost. Technika používaná pro měření této rychlosti se nazývá *Laserová dopplerova velocimetrie*.



Obrázek 11 Schéma cely a znázornění pohybu částic

Princip metody laserové dopplerovy velocimetrie spočívá v záření laseru o dané vlnové délce a jeho zachycení. Tato přijímací optika je zaostřena tak, aby přenášela rozptýl

částic v kyvetě. Světlo rozptýlené v úhlu 17° se kombinuje s referenčním paprskem. To vyvolá kolísající signál intenzity, kde poměr fluktuace je úměrný rychlosti částic. Pro vytáhnutí charakteristických frekvencí v rozptýleném světle se používá digitální procesor signálu.[23]

5.1.1. Praktický postup při měření zeta potenciálu

Pro samotné měření se používá cela (obr.12) s dvěma elektrodami a kapilárou. Vlastní měření bylo prováděno při konstantních laboratorních podmínkách (teplota 25°C). Poté na řadu přichází vlastní měření, kdy je cela naplněna vzorkem pomocí injekční stříkačky a následně oba její konce jsou ucpány zátkami. Celu je nutné očistit od zbytků vzorku, mastnot a jiných nečistot. Poté celu vložíme do přístroje Zetasizer Nano, nastavíme počáteční parametry (teplota, viskozita atd.) a následně se spustí vlastní proces měření.



Obrázek 12 cela pro měření zeta potenciálu[34]

Jak už bylo dříve uvedeno, jako vzorky byly vybrány a analyzovány:

- Kalcit
- Popílek
- Uhlíkový kal
- Černé uhlí z oblasti Paskova

5.1.2. Měření velikosti zeta potenciálu pro jednotlivé vzorky

V následujících tabulkách, které jsou sestaveny pro každý vzorek je přehledně uvedena velikost zeta potenciálu a konduktivity. Každé měření bylo prováděno 3x. V každé z tabulek je první soubor měření prováděn v roztoku vzorku a destilované vody. Vzorek bylo nutné před měřením vždy upravit drcením a mletím na požadovanou velikost frakce, která činila od 6 po 60 mikrometrů. Takto upravený vzorek byl nasypán do kádinky s destilovanou vodou (100ml) a následně zhomogenizován. Poté bylo odebráno potřebné množství takto homogenizované směsi do cely a provedeno měření. Tento postup jsme pak dále opakovali i u dalších souborů měření. Jenom s tím rozdílem, že ke směsi vzorku a destilované vody bylo přidáno v prvním případě Polyfosforečnan sodný. Jeho množství bylo takové, aby nám vznikl 1% roztok. Tento roztok jsme pak dále ještě ředily v poměru 1:10. Ve druhém případě jsme přidali Chlorid sodný, v množství takovém, aby vznikl 5-ti % roztok a tento roztok jsme dále opět ředily v poměru 1:10.

MĚŘENÍ ZETA POTENCIÁLU A KONDUKTIVITY - KALCIT		
Vzorek	Zeta potenciál [mV]	Konduktivita [mS/cm]
Kalcit 1	1,95	0,0554
Kalcit 2	1,25	0,0546
Kalcit 3	2,25	0,0567
Kalcit NaPP 1.0 redeno 1:10 1	-21,1	6,09
Kalcit NaPP 1.0 redeno 1:10 2	-21,6	6,21
Kalcit NaPP 1.0 redeno 1:10 3	-23,1	6,33
Kalcit CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 1	3,01	0,2356
Kalcit CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 2	4,53	0,3553
Kalcit CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 3	9,07	0,7111

Tabulka 7 Hodnoty zeta potenciálu a konduktivity u Kalcitu

U kalcitu můžeme pozorovat vcelku výraznou změnu zeta potenciálu u roztoku kalcitu, destilované vody a polyfosforečnanu sodného. Kdy se zeta potenciál posunul z oblasti rychlé koagulace a flokulace do oblasti počínající nestability. Ovšem všechny hodnoty zeta potenciálu zůstávají mezi nízko nabitými povrchy. Tato změna zeta potenciálu je v závislosti na změně (zvýšení) konduktivity. Toto dělení stability a nestability je z hlediska vodárenského, kdy potřebujeme co možná nejnižší hodnoty zeta potenciálu, aby se nám jednotlivé částice shlukovali, následně sedimentovali co nejrychleji a mi je mohli lépe separovat. V našem případě je posouzení stability a nestability zcela

opačné. Kdy potřebujeme zabránit sedimentace jednotlivých částic a udržet částici v konstantní výšce vodního sloupce nebo vzduchu.

MĚŘENÍ ZETA POTENCIÁLU A KONDUKTIVITY - POPÍLEK		
Vzorek	Zeta potenciál [mV]	Konduktivita [mS/cm]
Popílek 1	-26,5	0,149
Popílek 2	-26,6	0,15
Popílek 3	-26,3	0,154
Popílek NaPP 1.0 redeno 1:10 1	-25,5	6,99
Popílek NaPP 1.0 redeno 1:10 2	-26,5	7,12
Popílek NaPP 1.0 redeno 1:10 3	-22,2	7,21
Popílek CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 1	7,9	23,1
Popílek CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 2	8,9	24,3
Popílek CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 3	7,19	25,1

Tabulka 8 Hodnoty zeta potenciálu a konduktivity u Popílku

Z výsledků měření vzorku popílku můžeme vypořadovat, že Polyfosforečnan sodný nijak neovlivňuje zeta potenciál popílku, ale malou měrou změni konduktivitu vzorku. Výraznou změnu hodnoty zeta potenciálu přinesl až přídavek Chloridu sodného, který tuto hodnotu posunu přiblížil izoelektrickému bodu a také výrazně zvýšil konduktivitu roztoku.

MĚŘENÍ ZETA POTENCIÁLU A KONDUKTIVITY - UHLI KAL		
Vzorek	Zeta potenciál [mV]	Konduktivita [mS/cm]
Uhlí Kal 1	-4,87	0,372
Uhlí Kal 1	-5,45	0,376
Uhlí Kal 1	-5,29	0,378
Uhlí Kal NaPP 1.0 redeno 1:10 1	-17,5	18,5
Uhlí Kal NaPP 1.0 redeno 1:10 2	-17,9	19,4
Uhlí Kal NaPP 1.0 redeno 1:10 3	-21,1	20,1
Uhlí Kal CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 1	5,74	22,4
Uhlí Kal CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 2	6,11	24,2
Uhlí Kal CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 3	7,54	25,1

Tabulka 9 Hodnoty zeta potenciálu a konduktivity uhelného kalu

U uhelného kalu je vidět, že každý z námi zvolených přídavek změnil výrazným způsobem zeta potenciál od původního roztoku vzorku a destilované vody. Dále jsi můžeme všimnout, že oba dva přídavky (aditiva) také výrazně posunuly hodnotu konduktivity. Je však zajímavé, že obě aditiva posunuly její hodnotu do přibližně stejných hodnot.

MĚŘENÍ ZETA POTENCIÁLU A KONDUKTIVITY - UHLÍ PASKOV		
Vzorek	Zeta potenciál [mV]	Konduktivita [mS/cm]
Uhli Paskov 1	-33	0,0137
Uhli Paskov 2	-32,7	0,0147
Uhli Paskov 3	-33,8	0,014
Uhli Paskov NaPP 1.0 redeno 1:10 1	-25,7	22
Uhli Paskov NaPP 1.0 redeno 1:10 2	-26,7	23,1
Uhli Paskov NaPP 1.0 redeno 1:10 3	-26,6	24
Uhli Paskov CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 1	4,43	22,7
Uhli Paskov CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 2	5,66	24,2
Uhli Paskov CaCl ₂ 5.0 redeno 1:10 3	4,32	25,2

Tabulka 10 Hodnoty zeta potenciálu a konduktivity u Černého uhlí z oblasti Paskov

Původní vzorek černého uhlí z oblasti Paskova vykazuje velmi vysokou hodnotu zeta potenciálu. Tato hodnota již spadá do oblasti střední stability. Po přidání ať už Polyfosforečnanu sodného nebo Chloridu vápenatého dojde ke snížení zeta potenciálu. U prvně jmenovaného přídavku je snížení této hodnoty menší a druhého jmenovaného aditiva je toto snížení podstatně výraznější. Obě hodnoty ovšem již spadají do oblasti počínající nestability. Zřejmé také je, že oba přídavky výrazně zvyšují konduktivitu, ale zajímavé je, že zhruba na stejnou hodnotu.

5.2. Měření velikosti částic pomocí přístroje Zetasizer Nano

Moje praktická část byla dále rozšířena o měření velikosti částic. K tomuto měření bylo znovu použito přístroje Zetasizer Nano. Je však nutno podotknout, že tento přístroj může měřit jen ve velmi omezeném rozsahu. Jeho rozsah je v intervalu od zhruba 1 nanometru až po 10 mikrometrů (10000 nanometrů).

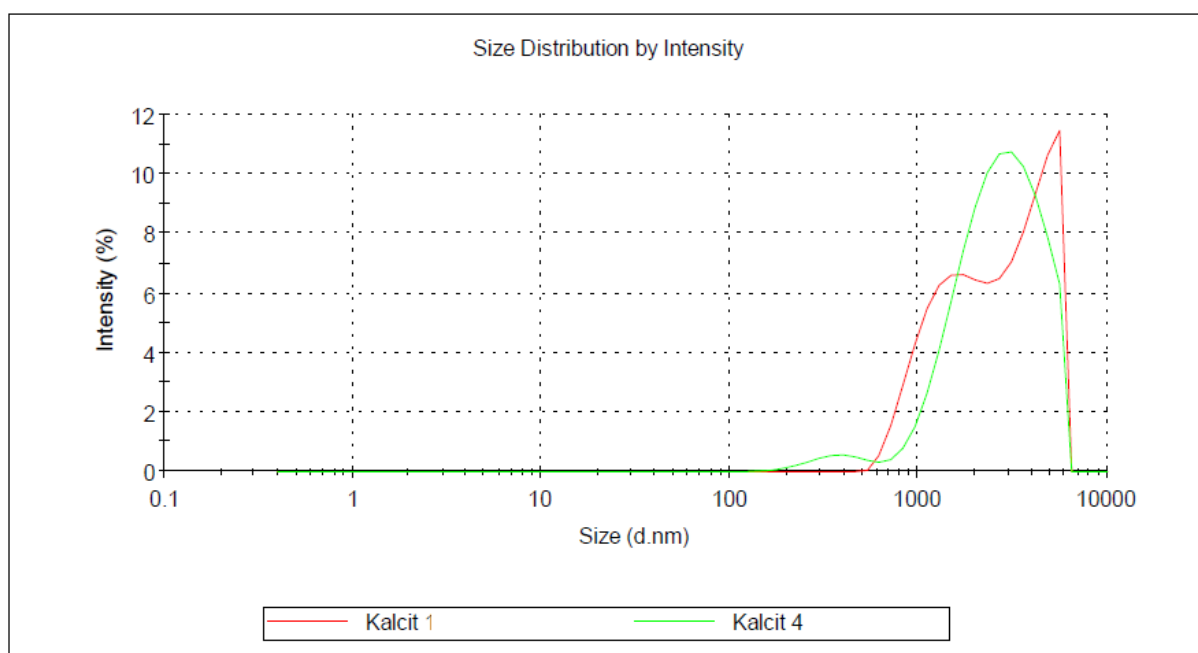
Jenom ve zkratce bych se zmínil o tom jaký je vlastně princip měření velikosti částic pomocí přístroje Zetasizer Nano.

Částice vzorku jsou osvětleny zdrojem světla (laser), které ho budou rozptylovat. Výstupem toho bude obrazovka tmavých a světlých míst. Protože jsou částice stále v pohybu, je i obrazovka stále v pohybu a velikost světlých a tmavých míst se mění. Přístroj měří rychlost změny obrazovky a z ní vypočítá velikost částic.[23]

Z tohoto hlediska nastaly zcela specifické podmínky odběru vzorku ke měření. Abychom dostaly výsledky, které jsou měřitelné museli jsme nejdříve zjistit, kde vlastně

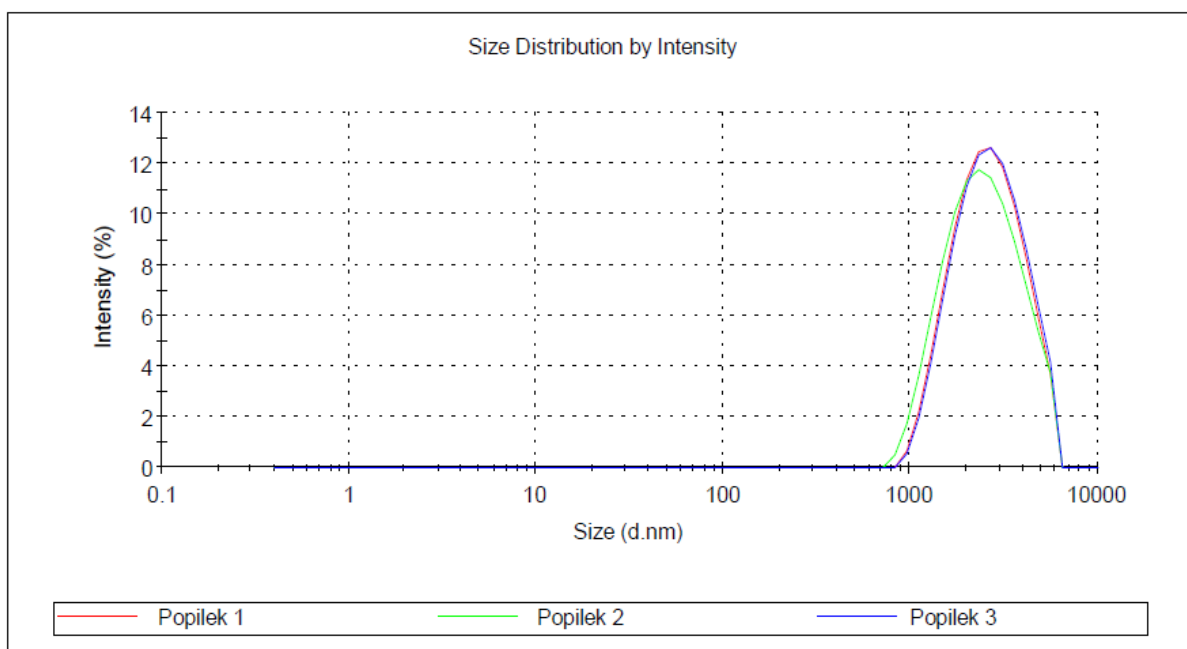
máme částice o takovéto velikosti hledat. K tomuto účelu jsme použili program *SediCalc*, který nám umožnil zjistit, po zadání parametrů (hustota kapaliny, viskozita, teplota atd.), jak velké částice najdeme v určitém čase v dané hloubce sedimentačního válce. Po získání těchto informací bylo odpipetován vzorek a použit k analýze. Výsledky této analýzy můžeme vidět v následujících grafech. Je třeba také dodat, že velikost částic byla měřena u všech vzorků s přídavkem Polyfosforečnanu sodného a Chloridu vápenatého.

Jako první jsou uváděny grafy Polyfosforečnanu sodného v kombinaci s jednotlivými vzorky.



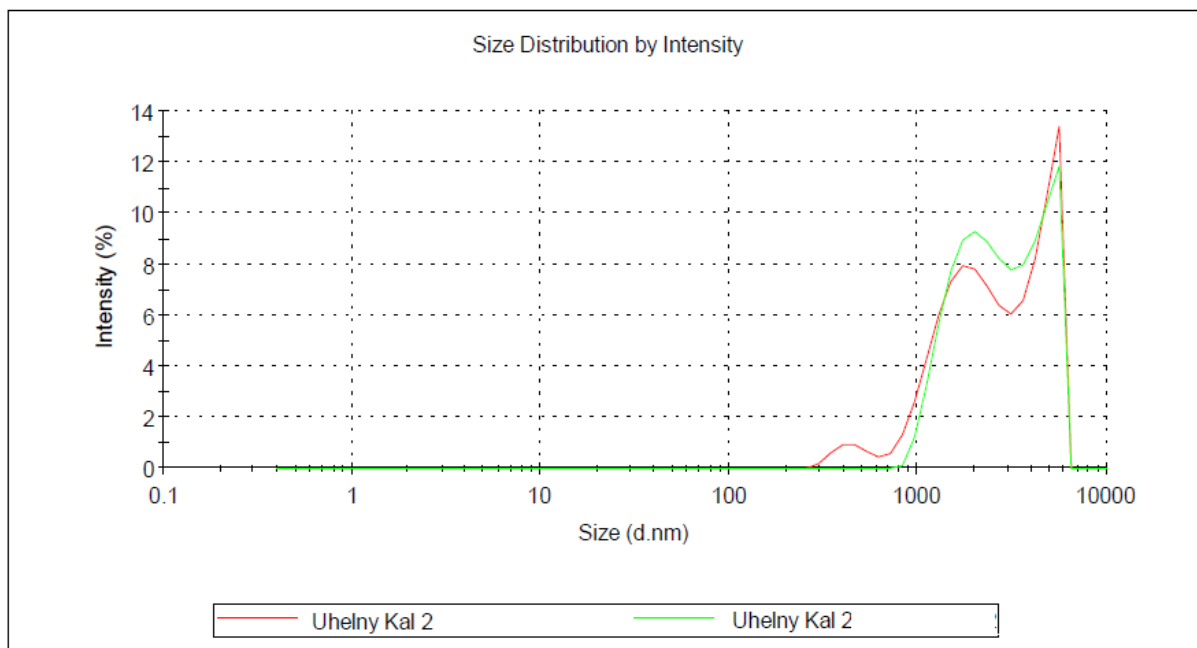
Obrázek 13 schéma intenzity velikosti částic u kalcitu s přídavkem Polyfosforečnanu sodného

Rozložení velikosti částic u prvního a druhého měření je poměrně různorodé. Můžeme zde vidět, že u prvního měření se začíná velikost částic už při 0,2 mikrometrů. Ve druhém případě se jedná až o velikost 0,5 mikrometru. Ovšem z výsledků měření také vyplývá shodný konec pro největší velikost částic a to je 0,65 mikrometru.



Obrázek 14 schéma intenzity velikosti částic u popílku a Polyfosforečnanu sodného

Následující graf nám ukazuje vysokou přesnost měření u všech tří odebraných vzorků popílku s přidavkem Polyfosforečnanu sodného. Je zde vidět, že všechny tři píky dosahují svého vrcholu na hodnotě okolo 3 mikrometrů. Od této hodnoty pomalu dochází k plynulému snížení množství částic o velikosti 4 až 7 mikrometrů. U hodnoty 8 až 10 mikrometrů přístroj naměřil 0 % zastoupení ve vzorku.

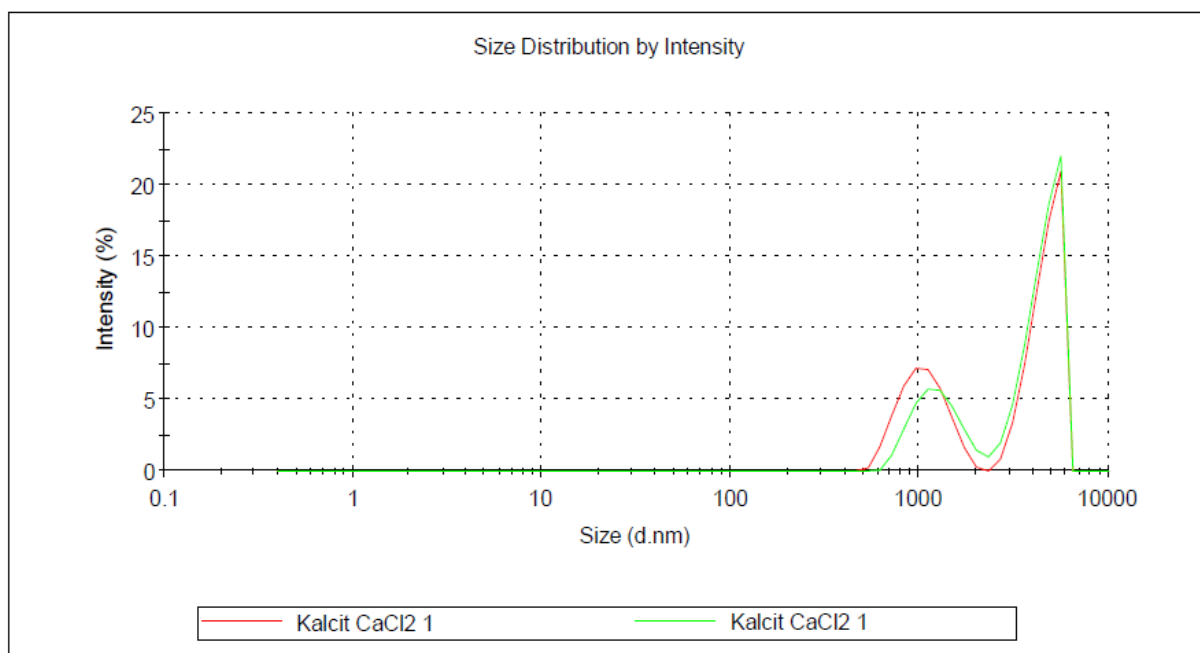


Obrázek 15 schéma intenzity velikosti částic u uhelného kalu v kombinaci s Polyfosforečnanem sodným

Rozdělení velikosti částic v daném, zkoumaném vzorku nám začíná už na hodnotě 0,3 mikrometru a končí na hodnotě zhruba 6,5 mikrometru. Svého maxima dosahuje křivka na hodnotě okolo 5,5 až 6 mikrometrů.

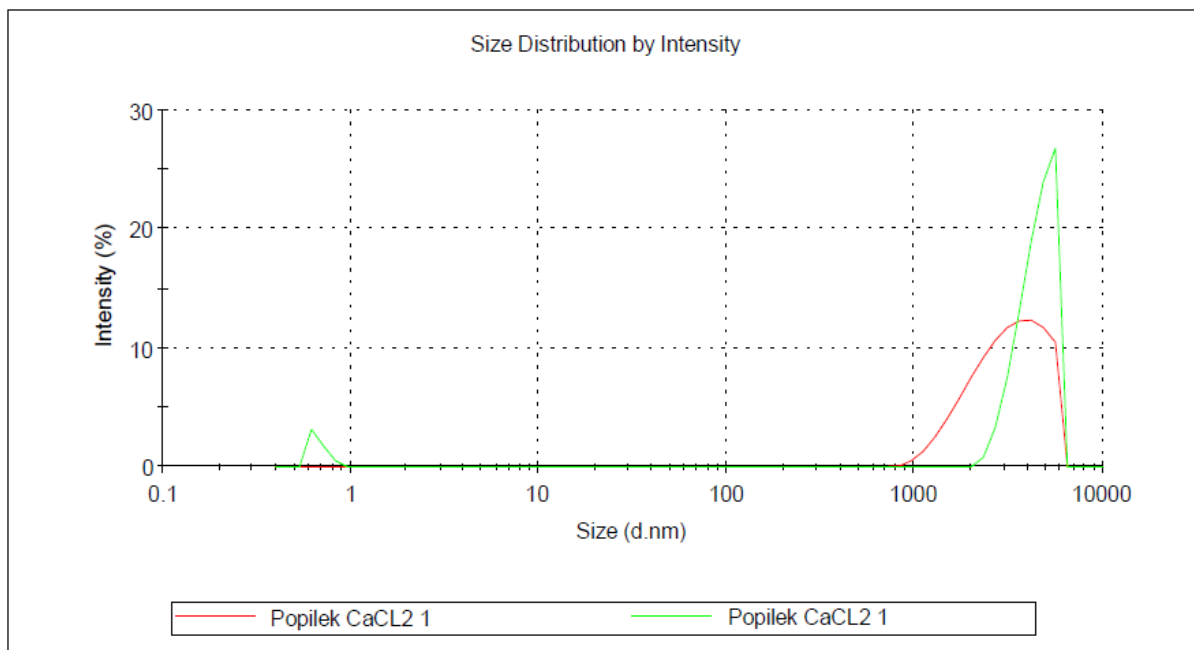
Jediným druhem vzorku, který se nepodařilo změřit bylo černé uhlí z oblasti Paskova v kombinaci s Polyfosforečnanem sodným.

Dále můžeme vidět grafy, kde se kombinují jednotlivé vzorky a jako aditivum je zde Chlorid vápenatý.



Obrázek 16 schéma intenzity velikosti částic kalcitu a chloridu vápenatého

Při měření velikosti částic, které jsme prováděli 2x, je patrné, že jednotlivé měření jsou v podstatě identická. Z těchto píků vyplývá, že největší procentuální zastoupení je u velikosti 1 mikrometr a 5 mikrometrů.



Obrázek 17 schéma intenzity velikosti částic popílku s přidavkem chloridu vápenatého

Jednotlivé píky popílku s přidavkem CaCl_2 jsou viditelně odlišné. Distribuce velikosti částic je stejná. Rozdíl je pouze v jejich koncentraci.

Distribuce velikosti částic je uváděna pouze pro kalcit a popílek s přidavkem chloridu vápenatého. U vzorků uhelného kalu a vzorku černého uhlí s oblasti Paskov s přidavkem chloridu vápenatého jsme nedošli k žádnému výsledku. Tyto dva vzorky nešlo změřit.

6. Shrnutí dosažených výsledků

U měření pH můžeme pozorovat, že jeho hodnota u obou přísadků je v kyselé oblasti a destilovaná voda v oblasti neutrální. Po přidání Polyfosforečnanu sodného směs zůstává v oblasti kyselé, po vytvoření směsi s Chloridem vápenatým se pH vzorků posune do zásadité oblasti. Tyto hodnoty mají vliv zejména pro nastavení základních podmínek při měření zeta potenciálu. Můžeme zde také srovnat změnu stability v kyselém a zásaditém prostředí.

Při vyhodnocení naměřených dat u viskozity směsi polyfosforečnanu sodného a chloridu vápenatého jsme došli k tomu, že změna ve viskozitě se pohybuje u všech měření od 1 po 1,14 mPa*s⁻¹. Tento údaj je opět důležitý pro nastavení základních parametrů pro měření zeta potenciálu. Hodnota v rozmezí 1 až 1,14 mPa*s⁻¹ nám ve skutečnosti ovšem pozmění výsledky měření zeta potenciálu velmi málo. Můžeme v podstatě tvrdit, že změna těchto hodnot je v praxi zanedbatelná.

Následně už jsme provedli měření zeta potenciálu. Toto měření jsme provedli pro samostatný vzorek v destilované vodě, pro vzorek s přísadkem Polyfosforečnanu sodného a pro vzorek s přísadkem chloridu sodného. Pro každou směs jsme měření 3 krát opakovali, abychom dostali lepší obraz o velikosti zeta potenciálu. Z toho vyplývá, že pro každý vzorek (kalcit, popílek atd.) jsme celkově provedli 9 měření. Do tabulek jsme uvedli kromě velikosti zeta potenciálu také velikost konduktivity. Jednotlivé naměřené velikosti rozebírám na jiném místě tohoto dokumentu (kapitola *Měření velikosti zeta potenciálu pro jednotlivé vzorky*) Z těchto tabulek a velikosti tohoto potenciálu můžeme však určit který vzorek a za jakých podmínek je nejstabilnější.

Stabilitu směsi posuzuji z hlediska udržení jednotlivých částic na jednom místě a zamezení jejich koagulaci. Je to tudíž úplný opak stability, která se uvádí v technologii vody, kde nejstabilnější vzorky jsou ty, které dobře koagulují.

Z tohoto pohledu jsou mezi jednotlivými vzorky nejstabilnější tyto:

- Kalcit – nejstabilnější v kombinaci s přísadkem Polyfosforečnanu sodného.
- Popílek – nejstabilnější v kombinaci pouze s destilovanou vodou.
- Uhelný kal – nejstabilnější v kombinaci s přísadkem Polyfosforečnanu sodného.

- Černé uhlí z oblasti Paskova – nejstabilnější ve směsi s destilovanou vodou.

Poslední měření bylo prováděno opět na přístroji Zetasizer Nano a měřili jsme velikost částic nebo spíš oblast velikosti částic od 1 až po 10 mikrometrů a zjišťovali procentuální zastoupení jednotlivých velikostí v daném vzorku s přidavkem jednotlivých aditiv. Tento postup jsme museli zvolit z důvodu, že přístroj Zetasizer Nano má velmi omezenou oblast měření velikosti částic.

Z jednotlivých grafů vyplývá, že kalcit s přidavkem Polyfosforečnanu sodného má největší zastoupení částic při velikosti okolo 4 mikrometrů. Popílek taktéž s přidavkem Polyfosforečnanu sodného má největší zastoupení u velikosti částic zhruba 2 až 3 mikrometry. U uhelného kalu je zřejmá vyrovnanost zastoupení velikosti částic od 1 až po 4 mikrometry a následný výrazný nárůst v zastoupení velikosti částic o velikost 6 mikrometrů.

Další vzorky už byly měřeny s přidavkem Chloridu sodného. Kalcit měl největší procento vzorků u velikosti částic 5 mikrometrů. Popílek má nejvíc částic u velikosti 5 až 6 mikrometrů, avšak jejich procentuální velikost se poměrně výrazně liší.

7. Závěr

Zaměření a cíl mé bakalářské práce bylo *Posouzení stability viskózních roztoků pro účely stanovení velikosti částic a zeta potenciálu*. K vyřešení tohoto problému nám posloužila jak teoretická část tohoto dokumentu, která nás seznámila ze základy koloidní chemie, zeta potenciálu atd., tak především praktická část ve které jsme provedli řadu měření jak zeta potenciálu námi zkoumaných vzorků s přidavkem různých aditiv i samostatně. Tak i měření velikosti částic, viskozity a pH daných vzorků a aditiv, ať už zvlášť nebo dohromady. Zejména velikost viskozity a pH sloužili k nastavení parametrů přístroje a tím pádem i zvýšení přesnosti měření velikosti zeta potenciálu.

Ze všech naměřených a zapsaných výsledků můžeme určit stabilitu jednotlivých vzorků, což bylo vlastně prvořadým úkolem této bakalářské práce.

Z tohoto pohledu můžeme konstatovat, že Polyfosforečnan sodný se jako nejlepší stabilizační aditivum jeví u vzorků kalcitu a uhelného kalu. Vzorky popílku a černého uhlí s oblasti Paskova se vzhledem k jejich stabilitě nejvíc vyplatí nechat pouze ve směsi s destilovanou vodou. Ani jedno aditivum se zde nejeví jako vhodné. Aditivum ve formě Chloridu vápenatého se z dosažených výsledků jeví pro námi vybrané vzorky jako zcela nevhodné. Nejenom že stabilitu vybraných vzorků nezvyšuje, ale přímo naopak ji snižuje. Opět je posouzení stability bráno vzhledem k zamezení koagulace a následné sedimentace. Kdybychom ovšem brali stabilitu z vodárenského hlediska, kdy požadujeme koagulaci a sedimentaci částic, Chlorid sodný by se naopak jevil jako nejlepší volba pro zvýšení stability.

Dané měření je prováděno jenom velmi okrajově (3 krát) a také počet zkoušených aditiv není vysoký a proto i výsledky se s počtem měření můžou více či méně měnit a lišit. Zajímavým navázáním této práce by bylo její další rozpracování, při vyzkoušení více druhů aditiv. Také počet jednotlivých měření by zcela nepochybně zvýšil přesnost výsledků. V neposlední řadě i zvýšení počtu vzorků, které bychom zkoumali by byl vhodný. Tímto způsobem bychom mohli dostat kvalitnější zprávu a výsledek o zachování stability jednotlivých vzorků a hlavně podmínek za kterých se tato stabilita dá dosáhnout.

Seznam literatury

- [1] BARTOVÁ L., ŠIŠKOVÁ M.: Co je co v povrchové a koloidní chemii [cit.2011-01-21]Dostupné zWWW: <www.vydavatelstvi.vscht.cz/.../ebook.help.html>
- [2] VOJUCKIJ S.S.: Kurs koloidní chemie, SNTL Praha, str.396
- [3] KVÍTEK L., PANÁČEK A.: Základy koloidní chemie, Olomouc: Universita Palckého, 2007
- [4] Vydavatelstvi.vscht.cz [online]. 2009 [cit. 2011-01-23]. Dostupné z WWW: www.vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-579-x/pdf/102.pdf
- [5] KVÍTEK L.: Metody studia koloidních soustav, Olomouc: Universita Palackého,2006
- [6] POUCHLÝ J., VAVRUCH I.: Fyzikální chemie koloidních soustav, STNL Praha 1960
- [7] Vydavatelstvi.vscht.cz [online]. 2009 [cit. 2011-01-31]. Dostupné z WWW: www.vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-579-x/pdf/160.pdf
- [8] Maturita z fyziky.cz [online]. 2011 [cit. 2011-01-15]. Dostupné z WWW: www.maturita-z-fyziky.cz/search/brown%C5%AFv%Zopohyb.html
- [9] Pise.cz [online]. 2011 [cit. 2011-03-08]. Dostupné z WWW: www.fyzmatik.pise.cz/75676-jak-funguje-difuze.html
- [10] Biologie.webz.cz [online]. 2011 [cit. 2011-02-17]. Dostupné z WWW: www.biologie.webz.cz
- [11] PERTILE E., ČABLÍK V.: Instrumentální metody analýzy, Ostrava:VŠB-TUO, 2006
- [12] HAYNIE DONALD T.: Biological Thermodynamics, Cambridge: Cambridge University Press, 2001, pp.130-136
- [13] Osmosis, Biologie.de [online]. 2011 [cit. 2011-03-25]. Dostupné z WWW: www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e22/22c.html
- [14] STRANADOVÁ N., JANDA V.: Technologie vody I., 2.vydání, Vydavatelství VŠCHT Praha, 1992. ISBN 80-7080-165-4
- [15] BALCÁREK J.,GOEBEL A., ŠMEJKAL Z., DUBÁNEK L.: Stanovení distribuce velikosti částic oxidu titaničitého, CHEM listy 92, 1998, str. 912-916
- [16] Cuni.cz [online]. 2011 [cit. 2011-02-10]. Dostupné z WWW: www.biomech.ftvs.cuni.cz/pbpk/kompendium/biomechanika/vlastnostireologické.php
- [17] cvut.cz [online]. 2011 [cit. 2011-03-15]. Dostupné z WWW: www.fyzport.fifi.cvut.cz/praktika/VnitřníTreniKap/praktika/wwwpraktika/node1.html
- [18] upol.cz [online]. 2011 [cit. 2011-04-03]. Dostupné z WWW: www.ulb.upol.cz/praktikum/visnav.pdf

- [19] Vydavatelstvi.vscht.cz [online]. 2009 [cit. 2011-02-07]. Dostupné z WWW: www.vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/elektrokineticky_potencial.html
- [20] BARTOVSKÁ L., ŠIŠKOVÁ M.: Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav, Praha: VŠCHT, 2010
- [21] KIRBY B.J.: Micro and nanoscale fluid mechanics: Transport in microfluidic devices, Cambridge: Cambridge University press, 2010. ISBN 978-0521119030
- [22] VILIMOVSKÁ M.: Zeta potenciál jako indikátor povrchových vlastností. CHEMagazín, 2008, 18, 2
- [23] Malvern.com [online]. 2011 [cit. 2011-03-18]. Dostupné z WWW: www.malvern.com/LabEng/products/ZetasizerNano/usermanual.html
- [24] MOULIN P., ROQUES H.: Zeta potential measurement of calcium carbonate, Journal of colloid and interface science, 2003, 168, str. 116
- [25] SRINIVASAN S., BARBHUIYA S.A., CHARAN D., PANDEY S.P.: Characterising cement – superplasticiser interaction using zeta potential measurement, Construction and building materials, 2009, 10, 7
- [26] Silver-colloids.com [online]. 2004 [cit. 2011-03-25]. Zeta potential. Dostupné z WWW: www.silver-colloids.com/Tutorials/Intro/pcs12.html
- [27] SILLERO A., MALDONADO A.: Isoelectric point determination of proteins and other macromolecules, Compul Biol Med. 36(2), 2006, str. 157-166
- [28] KILIÁNOVÁ M.: Studium přípravy nanokompozitů na bázi kovů a jejich oxidů, Olomouc: Diplomová práce, Universita Palackého, 2010
- [29] Cuni.cz [online]. 2011 [cit. 2011-02-10]. Dostupné z WWW: www.ksicht.natur.cuni.com/serialy/nanocastice/1.html
- [30] NOVÁK J., et al.: Fyzikální chemie II., 1. st. edice, Praha: VŠCHT Praha, 2001. ISBN 80-7080-436
- [31] SALEH N., KIM H.-J., PHENRAT T., MATYJASZEWSKI K., TILTON R.D., LOWRY G.V.: Ionic strength and composition affect the mobility of surface modified FeO nanoparticles in water – Saturated sand columns, Environmental science technology 42(9), 2008
- [32] KLIMKOVÁ Š., NOSEK J., PLUHAŘ T., ČERNÍK M.: Vlastnosti železných nanočástic, Odpadové fórum 2009, Šprochem 2009, str. 3598
- [33] FREITAS C., MULLER R.H.: Effect of light and temperature on zeta potential and physical stability in solid lipid nanoparticle dispersion, International journal of pharmaceutics 168, 1998, str. 221
- [34] ŘEZNIČKOVÁ I.: Vliv změny zeta potenciálu koloidních roztoků na membránové procesy, Ostrava: Bakalářská práce, VŠB-TUO, 2010

Seznam obrázků

Obrázek 1 Distribuční křivka koloidní soustavy mají 19 frakcí různě velikých částic.....	4
Obrázek 2 Nárazy molekul disperzního prostředí do koloidní částice.....	6
Obrázek 3 Princip difúze	7
Obrázek 4 Tok kapaliny trubicí ve vrstvách.....	11
Obrázek 5 Stokesův viskozimetr	12
Obrázek 6 Absorpční spektra solí zlata měnící se s narůstajícím stupněm disperzity solu.....	15
Obrázek 7 Tyndallův jev	16
Obrázek 8 Závislost rozptylu světla na stupni disperzity (r je poloměr částic) v suspenzi BaSO_4	17
Obrázek 9 Rozpad elektrostatického potenciálu v blízkosti koloidu	21
Obrázek 10 a) elektrostatická stabilizace b) stérická stabilizace koloidů kovů.....	23
Obrázek 11 Schéma cely a znázornění pohybu částic	29
Obrázek 12 Cella pro měření zeta potenciálu	30
Obrázek 13 Schéma intenzity velikosti částic u kalcitu s přidavkem polyfosforečnanu sodného	34
Obrázek 14 Schéma intenzity velikosti částic u popílku a polyfosforečnanu sodného	35
Obrázek 15 Schéma intenzity velikosti částic u uhelného kalu v kombinaci s polyfosforečnanem sodným	35
Obrázek 16 Schéma intenzity velikosti částic kalcitu a chloridu vápenatého	36
Obrázek 17 Schéma intenzity velikosti částic popílku s přidavkem chloridu vápenatého.....	37

Seznam tabulek

Tabulka 1 Členění disperzních soustav dle velikosti dispergovaných částic a jejich základních vlastností. Symbol d představuje velikost částic v metrech	3
Tabulka 2 Klasifikace koloidních soustav dle fázového složení	5
Tabulka 3 Stabilita chování koloidů	21
Tabulka 4 Hodnoty pH jednotlivých látek.....	26
Tabulka 5 Hodnoty pH u směsi destilované vody, vzorku a přidavku	27
Tabulka 6 Měření dynamické viskozity vodného roztoku Polyfosforečnanu sodného a Chloridu vápenatého.....	28
Tabulka 7 Hodnoty zeta potenciálu a konduktivity u Kalcitu	31
Tabulka 8 Hodnoty zeta potenciálu a konduktivity u Popílku.....	32
Tabulka 9 Hodnoty zeta potenciálu a konduktivity uhelného kalu.....	32
Tabulka 10 Hodnoty zeta potenciálu a konduktivity u Černého uhlí z oblasti Paskov.....	33